



Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



TESIS

**Evaluación de cobertura 4G a 700MHz y 2600MHz en localidades
rurales del distrito de Canchaque mediante NS3**

**Para obtener el título profesional de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Elaborado por:

Bach. Everth Mitchel, Santamaria Bazan

Bach. Jesús Alberto, Ramirez Gastelo

ASESOR:

MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.
ORCID: 0000-0002-0103-7222

Lambayeque-Perú

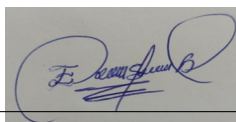
2026

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

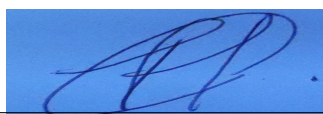
TESIS

**Evaluación de cobertura 4G a 700MHz y 2600MHz en
localidades rurales del distrito de Canchaque mediante NS3**

Elaborado por:



Bach. Everth Mitchel, Santamaria Bazan



Bach. Jesús Alberto, Ramirez Gastelo

ASESOR



MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.

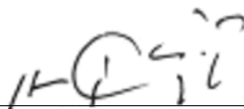
LAMBAYEQUE - PERÚ

2026

JURADOS



Dra. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera
Presidente



M.Sc. Ing. Hugo Javier, Chiclayo Padilla
Secretario



Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Vocal

ASESOR



MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.

Lambayeque-Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 - 2023-SUNEDU / CD



0097

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 058-2026.-D/FACFyM

Siendo las 10:00 AM del día 05 de agosto del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

evaluación de cobertura 46 a 700 MHz y 2000 MHz en localidades rurales del distrito de Cauchaque mediante NS3

Designados por Resolución N° 136-2025-D

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dra. Ing. Lucia Isabel Chamaín Cabrera

Presidente

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

Secretario

Dr. Ing. Carlos Leonardo Obitos Vera

Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M.Sc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano nombrado por Resolución N° 136 - 2025

D/FACFyM de fecha 10 de febrero de 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 541 - 2026 - D/FACFyM de fecha 17 de julio de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Everth Mitchel Santamaría, Brian y Jesús Alberto Ramírez Gascelo y tuvo una duración de 45 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 11 AM se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Dra. LUCIA ISABEL CHAMAÍN CABRERA
Presidente

M.Sc. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
Secretario

DR. INC. CARLOS LEONARDO OBITOS VERA
Vocal

M.Sc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
Asesor

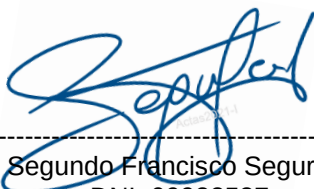
CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Segundo Francisco Segura Altamirano, usuario revisor del documento titulado **“Evaluación de cobertura 4G a 700MHz y 2600MHz en localidades rurales del distrito de Canchaque mediante NS3”**; presentado por el Bachiller en Ingeniería Electrónica Everth Mitchel, Santamaria Bazan y el b Bachiller en Ingeniería Electrónica Jesús Alberto, Ramirez Gastelo , Identificado con Documento de Identidad 09922587; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **3%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 24 de marzo de 2026



MSc. Ing Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI: 09922587
Asesor

Se adjunta:

*Resumen de Reporte automatizado de similitudes

*Recibo Digital

ORIGINALITY REPORT

3%

SIMILARITY INDEX

3%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

2%

STUDENT PAPERS

MATCH ALL SOURCES (ONLY SELECTED SOURCE PRINTED)

1%

★ repositorio.unprg.edu.pe
Internet Source


MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI 09922587
Asesor

Exclude quotes Off
Exclude bibliography On

Exclude matches < 15 words



Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Everth Mitchel/jesús Alberto Santamaria Bazan/ramirez Gastelo
Assignment title: Quick Submit
Submission title: TF
File name: main.pdf
File size: 7.56M
Page count: 92
Word count: 24,411
Character count: 129,892
Submission date: 26-Feb-2026 05:31PM (UTC-0500)
Submission ID: 2889376650



Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



Tesis

Evaluación de cobertura 4G a 700MHz y 2600MHz en localidades
rurales del distrito de Canchaque mediante NS3

para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

presentado por:

Bach. Everth Mitchel, Santamaria Bazan
Bach. Jesús Alberto, Ramirez Gastelo

Asesor:

MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano.
Lambayeque-Perú

2026


MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI 09922587
Asesor

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor de tesis por su apoyo profesional en el proyecto. Y también agradecer a la universidad pedro Ruiz gallo y a la escuela de ingeniería electrónica por brindarme los recursos y el conocimiento necesarios para mi formación profesional.

Bach. Everth Mitchel, Santamaria Bazan

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

A la Universidad PEDRO RUIZ GALLO que permitió desarrollarme como profesional en el camino de mi carrera, formándome como una persona emprendedora y con metas. El agradecimiento indiscutible a mi madre, por su sacrificio, orientación y apoyo permanente, que ha hecho posible alcanzar este logro. De igual manera, agradezco a mi asesor, por su acompañamiento, dedicación y valiosas orientaciones durante el desarrollo de la presente tesis.

Bach. Jesús Alberto, Ramirez Gastelo

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a DIOS por permitirme avanzar en mi carrera profesional. Y también a mi Madre por su buenos consejos, a mi Hermano, esposa e hijos que son el motivo de seguir formandome en mi carrera profesional.

Bach. Everth Mitchel, Santamaria Bazan

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

En primera instancia le dedico a Dios por su gran amor y guía espiritual que me ha brindado durante todo este tiempo para cumplir mis objetivos propuestos. A mis padres, que siempre estuvieron apoyándome en todo momento y nunca dejaron de creer en mí, a mi novia que me motiva a salir adelante, a mi abuelita y a mi tía, por su amor, apoyo incondicional y confianza constante, que han sido un pilar fundamental a lo largo de este camino.

Bach. Jesús Alberto, Ramirez Gastelo

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

RESUMEN

La brecha digital en zonas rurales andinas del Perú plantea la necesidad de identificar la banda de frecuencia más adecuada para el despliegue de redes móviles 4G en territorios con alta dispersión poblacional y topografía montañosa. El objetivo de esta investigación fue evaluar la cobertura de redes 4G en las bandas de 700 MHz (B28a) y 2600 MHz (B38) en el distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura, considerando sus características demográficas y geográficas. Se desarrolló una plataforma de simulación que integra NS-3 v3.43 con SUMO v1.25.0, mediante la cual se ejecutaron 70 simulaciones (35 localidades $\times$ 2 bandas) con el modelo de propagación Okumura-Hata, seis perfiles de tráfico diferenciados y trazas de movilidad vehicular y peatonal. Los resultados evidenciaron una diferencia de 47 dB en RSRP a favor de 700 MHz, con una cobertura del 100 % frente al 18,3 % de 2600 MHz y un alcance 3,9 veces superior. La brecha de cobertura se amplificó desde 26,7 puntos porcentuales en el escenario urbano hasta 98,7 en el extremo rural, dejando a 4 154 habitantes (63,6 %) sin cobertura en la banda alta. Esta progresión responde a un efecto umbral en el RSRP de 2600 MHz, cuya atenuación por frecuencia no es compensable mediante ajustes moderados de potencia. Todas las diferencias resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,001$). Se concluye que la banda de 700 MHz constituye la opción técnicamente viable para garantizar conectividad 4G en localidades rurales dispersas, mientras que 2600 MHz solo aporta valor como complemento de capacidad en el núcleo urbano de la capital distrital.

Palabras clave: Brecha digital, Redes 4G LTE, Modelos de propagación de radio, Bandas de frecuencia, Conectividad rural.

ABSTRACT

The digital divide in rural Andean zones of Peru highlights the necessity of identifying the most suitable frequency band for 4G mobile network deployment in territories characterized by high population dispersion and mountainous topography. The objective of this research was to evaluate 4G network coverage in the 700 MHz (B28a) and 2600 MHz (B38) bands in the Canchaque district, Huancabamba province, Piura region, accounting for its specific demographic and geographical features. A simulation platform was developed by integrating NS-3 v3.43 with SUMO v1.25.0, through which 70 simulations were executed (35 locations $\times$ 2 bands) using the Okumura-Hata propagation model, six differentiated traffic profiles, and vehicular and pedestrian mobility traces. The results demonstrated a 47 dB difference in RSRP in favor of 700 MHz, achieving 100% coverage compared to 18.3% for 2600 MHz, with a coverage radius 3.9 times greater. The coverage gap widened from 26.7 percentage points in urban scenarios to 98.7 in extreme rural settings, leaving 4,154 inhabitants (63.6%) without coverage in the high band. This progression is due to a threshold effect in the 2600 MHz RSRP, where frequency-dependent attenuation cannot be compensated by moderate power adjustments. All differences were statistically significant ($p < 0,001$). It is concluded that the 700 MHz band is the only technically viable option to guarantee 4G connectivity in dispersed rural localities, while 2600 MHz serves only as a capacity supplement for the district's urban center.

Keywords: Digital divide, 4G LTE networks, Radio propagation modeling, Frequency bands, Rural connectivity.

ÍNDICE GENERAL

Reconocimientos	v
Dedicatoria	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice de figuras	xiii
Índice de Tablas	xiv
Introducción	1
1. Diseño Teórico	4
1.1. Antecedentes de la Investigación	4
1.2. Bases Teóricas	6
1.2.1. Fundamentos de Propagación en Redes Móviles	6
1.2.2. Arquitectura de Redes LTE y 5G en Entornos Rurales	6
1.2.3. Simulación de Redes Basada en Eventos Discretos (NS-3)	7
1.2.4. Brecha Digital y Factores Socioeconómicos	8
1.3. Bases Conceptuales	8
1.3.1. Definición de Términos Clave	8
1.3.2. Operacionalización de Variables	9
1.4. Marco Legal y Normativo	10
1.4.1. Estándares 3GPP	10
1.4.2. Normativa de Espectro	10
1.4.3. Indicadores de Calidad de Servicio (QoS)	10
2. Diseño Metodológico	11
2.1. Diseño de Investigación	11
2.2. Población y Muestra	12

	x
2.2.1. Población	12
2.2.2. Muestra	12
2.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	13
2.3.1. Instrumentos de Software	13
2.3.2. Procedimientos de Aplicación	13
2.4. Métodos de Análisis de Datos	14
2.4.1. Procesamiento de Datos	14
2.4.2. Análisis Estadístico	15
3. Resultados	16
3.1. Identificación de Aspectos Demográficos y Geográficos	17
3.1.1. Caracterización demográfica del distrito de Canchaque	17
3.1.1.1. Análisis de dispersión poblacional	17
3.1.1.2. Distribución poblacional por categorías	18
3.1.1.3. Concentración poblacional en la capital distrital	20
3.1.1.4. Identificación de localidades con viabilidad para cobertura 4G	20
3.1.2. Caracterización geográfica del distrito de Canchaque	21
3.1.2.1. Ubicación y extensión territorial	21
3.1.2.2. Análisis de accesibilidad geográfica	22
3.1.3. Definición de escenarios de simulación para SUMO	23
3.1.3.1. Escenario 1: Urbano concentrado	23
3.1.3.2. Escenario 2: Semi-urbano	24
3.1.3.3. Escenario 3: Rural	24
3.1.3.4. Escenario 4: Extremo rural	25
3.1.3.5. Resumen de la configuración de escenarios	25
3.1.4. Localidades simuladas por escenario	26
3.1.5. Implicaciones para la cobertura de redes móviles 4G	27
3.2. Resultados del Objetivo Específico 2: Diseño de Escenarios de Simulación en NS-3 Integrados con SUMO	29
3.2.1. Arquitectura del sistema de simulación NS-3/SUMO	29
3.2.2. Configuración técnica de las bandas de frecuencia	30
3.2.2.1. Banda de 700 MHz (B28a – APT)	31

3.2.2.2.	Banda de 2600 MHz (B38)	32
3.2.3.	Modelo de propagación	33
3.2.4.	Diseño de los escenarios de simulación	33
3.2.4.1.	Escenario 1: Urbano concentrado (Canchaque capital)	34
3.2.4.2.	Escenario 2: Semi-urbano (localidades medianas)	34
3.2.4.3.	Escenario 3: Rural (localidades pequeñas)	35
3.2.4.4.	Escenario 4: Rural extremo (localidades muy pequeñas)	36
3.2.5.	Generación de escenarios de movilidad en SUMO	36
3.2.6.	Integración de la movilidad SUMO en NS-3	37
3.2.7.	Perfiles de tráfico de datos	39
3.2.8.	Sistema de recolección de métricas	41
3.2.9.	Sistema de orquestación automatizada	42
3.2.10.	Parámetros generales de simulación	43
3.2.11.	Consideraciones y limitaciones del diseño	44
3.3.	Indicadores de Cobertura Móvil	45
3.3.1.	Indicadores globales de cobertura	45
3.3.2.	Análisis por tipo de escenario demográfico	45
3.3.2.1.	Escenario urbano	46
3.3.2.2.	Escenario semi-urbano	46
3.3.2.3.	Escenario rural	47
3.3.2.4.	Escenario extremo rural	47
3.3.3.	Clasificación de cobertura según 3GPP	47
3.3.4.	Análisis por localidad	49
3.3.4.1.	Localidades críticas	51
3.3.5.	Relación entre RSRP y distancia al eNodeB	52
3.3.6.	Distribución acumulada de RSRP por escenario	52
3.3.7.	Mapa de calor de indicadores por localidad	52
3.3.8.	Rendimiento por perfil de tráfico	55
3.3.9.	Throughput por escenario demográfico	55
3.3.10.	Significancia estadística de las diferencias	57
3.4.	Comparación de Desempeño por Escenario	58

3.4.1. Ventaja comparativa de 700 MHz sobre 2600 MHz	58
3.4.2. Comparación por escenario demográfico	58
3.4.2.1. Perfil multidimensional por escenario	60
3.4.3. Impacto poblacional de la brecha de cobertura	62
3.4.4. Análisis de correlación demográfica	62
3.4.5. Distribución geográfica de la cobertura	63
3.4.6. Significancia estadística	65
3.4.7. Validación de la hipótesis de investigación	65
3.4.8. Recomendaciones de despliegue	66
4. Discusión de Resultados	68
4.1. Discusión	68
Recomendaciones	70
4.2. Recomendaciones	70
Conclusiones	72
Referencias	78

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Distribución poblacional del distrito de Canchaque	19
3.2. Distribución geográfica de las localidades del distrito de Canchaque	23
3.3. Arquitectura del sistema de simulación integrado NS-3/SUMO	30
3.4. Resumen visual de los cuatro escenarios de simulación diseñados para el distrito de Canchaque	35
3.5. Diagrama de flujo del proceso de simulación NS-3 integrado con trazas de movilidad SUMO, desde la lectura de parámetros hasta la generación de archivos de resultados.	38
3.6. Estructura de los perfiles de tráfico implementados en la simulación, con las probabilidades de asignación y la distribución ON/OFF utilizada para modelar la intermitencia del tráfico.	40
3.7. Diagrama del sistema de orquestación automatizada para la ejecución de las 70 simulaciones NS-3	42
3.8. Distribución de RSRP y SINR por escenario demográfico.	48
3.9. Clasificación 3GPP de muestras RSRP por escenario.	49
3.10. RSRP, SINR y cobertura por localidad para ambas bandas.	51
3.11. RSRP en función de la distancia al eNodeB por escenario.	53
3.12. Distribución acumulada de RSRP por escenario y banda.	53
3.13. Mapa de calor de indicadores por localidad y banda.	54
3.14. Indicadores de cobertura y throughput por perfil de tráfico.	56
3.15. Ventaja de 700 MHz en RSRP y cobertura por localidad.	59
3.16. Comparación de indicadores por escenario demográfico.	61
3.17. Perfil multidimensional de desempeño por escenario y banda.	61
3.18. Correlación entre variables demográficas y cobertura.	64
3.19. Distribución geográfica de la cobertura por banda.	64
3.20. Significancia estadística de las diferencias por localidad.	65

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Indicadores demográficos generales del distrito de Canchaque.	17
3.2. Indicadores estadísticos de dispersión poblacional del distrito de Canchaque. . .	18
3.3. Distribución de localidades del distrito de Canchaque por categoría poblacional.	19
3.4. Concentración poblacional: capital Canchaque frente al resto del distrito. . . .	20
3.5. Las 10 localidades de mayor población del distrito de Canchaque.	21
3.6. Distribución de localidades según nivel de accesibilidad a la capital distrital. . .	22
3.7. Resumen de los escenarios de simulación definidos para SUMO a partir del análisis demográfico y geográfico del distrito de Canchaque.	25
3.8. Localidades incluidas en la simulación, organizadas por escenario demográfico.	26
3.9. Parámetros de configuración de la simulación para la banda de 700 MHz (B28a).	31
3.10. Parámetros de configuración de la simulación para la banda de 2600 MHz (B38).	32
3.11. Parámetros de configuración de los cuatro escenarios de simulación.	34
3.12. Perfiles de tráfico implementados en la simulación, con las probabilidades de asignación y los parámetros de configuración de cada perfil.	40
3.13. Métricas recolectadas durante la simulación, mecanismos de captura y archivos de salida.	41
3.14. Parámetros generales de simulación compartidos por ambas bandas y todos los escenarios.	44
3.15. Indicadores globales de cobertura para ambas bandas.	46
3.16. Indicadores de cobertura por escenario demográfico.	46
3.17. Clasificación de cobertura 3GPP por escenario y banda.	49
3.18. Indicadores de cobertura por localidad y banda de frecuencia.	50
3.19. Indicadores de cobertura y throughput por perfil de tráfico.	55
3.20. Ventaja de 700 MHz sobre 2600 MHz por localidad.	59
3.21. Comparación de desempeño por escenario demográfico.	60
3.22. Impacto poblacional de la cobertura por banda.	62
3.23. Correlaciones entre variables demográficas y cobertura de 2600 MHz.	63
3.24. Evidencia cuantitativa para la validación de la hipótesis.	66
3.25. Estrategia de banda recomendada por zona de despliegue.	67

INTRODUCCIÓN

La conectividad en redes móviles se ha convertido en un pilar fundamental para el desarrollo socioeconómico global, sin embargo, las áreas rurales continúan enfrentando desafíos significativos para acceder a servicios de banda ancha de calidad, fenómeno conocido como la brecha digital rural. A nivel global, se observa que la cobertura de servicios de alta velocidad es considerablemente menor en zonas rurales en comparación con las urbanas, debido principalmente a la baja densidad de suscriptores que dificulta el retorno de inversión para los operadores de telecomunicaciones (Feltrin et al., 2021). Esta problemática se ve exacerbada en regiones con orografía compleja, donde las características del terreno y la dispersión de los asentamientos humanos imponen barreras técnicas severas para la propagación de señales electromagnéticas (Cabrera-Castellanos et al., 2021). En este contexto, la elección de la banda de frecuencia adecuada es crucial; mientras que las bandas bajas como la de 700 MHz son valoradas por su capacidad de cobertura y penetración en entornos rurales, las bandas medias y altas, como la de 2600 MHz, suelen ofrecer mayor capacidad pero sufren de una atenuación más rápida, limitando su alcance efectivo (Nashiruddin et al., 2024). Estudios recientes indican que la inversión en infraestructura de banda ancha tiene un impacto directo en la cobertura, aunque la adopción final por parte de los usuarios depende también de factores socioeconómicos y habilidades digitales (Moral-Arce et al., 2025).

En el ámbito de la Ingeniería Electrónica y las telecomunicaciones, las tendencias actuales para abordar estos desafíos se centran en la planificación eficiente de redes heterogéneas y el uso de tecnologías de simulación avanzadas para predecir el comportamiento de la red antes del despliegue físico. El uso de pequeñas celdas (Small Cells) y la densificación de la red son estrategias comunes, pero requieren una evaluación precisa de la propagación en escenarios específicos (Jaimes-Illanes, 2021). Asimismo, la mejora de la calidad de la señal en áreas rurales mediante repetidores y configuraciones optimizadas de estaciones base sigue siendo un área de investigación activa para garantizar niveles adecuados de RSRP (Reference Signal Received Power) y SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) (Ubaidullah, 2022). Para realizar estas evaluaciones sin incurrir en los costos prohibitivos de las pruebas de campo extensivas, la comunidad científica recurre cada vez más a simuladores de redes de eventos discretos como NS-3, que permiten modelar con gran fidelidad las capas físicas y MAC de

tecnologías LTE y 5G Ferreira et al. (2023). Además, la integración de estos simuladores de red con herramientas de movilidad urbana como SUMO permite generar escenarios de tráfico y movimiento realistas, proporcionando una visión más completa del rendimiento de la red en condiciones dinámicas, lo cual es esencial para evaluar el ancho de banda y la calidad de experiencia en comunidades rurales (Maslen & Nunez, 2021).

La presente investigación se justifica teóricamente en la necesidad de profundizar en el análisis comparativo de modelos de propagación en entornos geográficos complejos, validando mediante simulación cómo las diferentes bandas de frecuencia interactúan con la topografía y la demografía dispersa. La relevancia práctica del estudio radica en su aplicación directa al distrito de Canchaque, una zona que tipifica los desafíos de la conectividad en la sierra peruana, donde la identificación de la banda óptima puede determinar la viabilidad de la inclusión digital para miles de habitantes. El acceso a infraestructura TIC adecuada es un prerrequisito para la implementación de intervenciones de salud digital, educación y comercio electrónico en países de ingresos bajos y medios (Hui et al., 2022). La viabilidad de esta investigación se sustenta en el uso de herramientas de simulación de código abierto como NS-3 y SUMO, las cuales permiten modelar escenarios complejos y obtener métricas detalladas de rendimiento sin la necesidad de despliegues físicos costosos, siguiendo metodologías validadas en la literatura reciente para la caracterización de tráfico y cobertura (Bermúdez Orozco et al., 2021). Además, el enfoque basado en agentes y la simulación de dinámicas de adopción proporcionan un marco robusto para entender cómo las decisiones técnicas afectan a la población objetivo (Agarwal & Canfield, 2024). Desde una perspectiva técnica, el análisis de límites de capacidad y cobertura en entornos mixtos urbano-rurales es crítico para optimizar el diseño de redes celulares de próxima generación, asegurando que la infraestructura propuesta sea sostenible y técnicamente competente (Zreikat & Alabed, 2022).

El problema general que guía esta investigación se plantea mediante la interrogante sobre cómo influyen los aspectos demográficos y geográficos en la cobertura de redes móviles 4G a 700MHz (B28a) y 2600MHz (B38) en el distrito de Canchaque mediante simulación NS3 y SUMO. De este problema principal se desprenden interrogantes específicas orientadas a determinar cuáles son las características demográficas y geográficas relevantes de las localidades rurales que influyen en la cobertura, qué resultados muestran las simulaciones en términos de intensidad (RSRP) y calidad de señal (SINR) para ambas bandas en los diferentes escenarios,

cómo varía el alcance de cobertura según dichos aspectos, y qué diferencias de desempeño existen entre las bandas bajo condiciones específicas.

En consonancia con la problemática planteada, el objetivo general de la investigación es evaluar la cobertura de redes móviles 4G a 700MHz (B28a) y 2600MHz (B38) considerando aspectos demográficos y geográficos en localidades rurales de el distrito de Canchaque mediante simulación NS3 y SUMO. Para alcanzar este propósito, se han establecido cuatro objetivos específicos: primero, identificar los aspectos demográficos y geográficos de las localidades rurales del distrito de Canchaque para definir escenarios de simulación en SUMO; segundo, diseñar escenarios de simulación en NS3 integrados con SUMO para las bandas 700MHz y 2600MHz, considerando patrones de movilidad; tercero, analizar los indicadores de cobertura (intensidad, calidad y alcance de señal) para ambas bandas en los escenarios simulados; y cuarto, comparar el desempeño de las bandas 700MHz y 2600MHz en función de los escenarios demográficos y geográficos definidos.

Finalmente, la hipótesis general que dirige este estudio sostiene que la cobertura de redes móviles 4G a 700MHz (B28a) presenta mejor desempeño que 2600MHz (B38) en el distrito de Canchaque considerando sus características demográficas y geográficas. Esta suposición se basa en las propiedades de propagación de las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, las cuales teóricamente ofrecen una mejor difracción y menor atenuación frente a los obstáculos orográficos y la dispersión poblacional propios de la zona de estudio.

CAPÍTULO 1 DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la Investigación

La revisión de la literatura especializada revela un interés creciente en la optimización de la cobertura de redes móviles en zonas rurales y de difícil acceso, utilizando herramientas de simulación avanzada para predecir el comportamiento de diferentes bandas de frecuencia. A continuación, se presentan estudios previos relevantes que fundamentan metodológica y teóricamente la presente investigación.

Maslen y Nunez (2021) desarrollaron una investigación titulada “Customized NS-3 Simulation for Bandwidth Assessment of Rural Communities”, con el objetivo de crear una conexión de red 4G LTE simulada para evaluar el ancho de banda en comunidades rurales. La metodología empleada se basó en el simulador de eventos discretos NS-3, configurando estaciones base (eNodeB) y equipos de usuario (UE) para modelar la capa física y de enlace. Los autores lograron establecer un marco de trabajo para simular conexiones de banda ancha, concluyendo que las tasas de descarga se ven afectadas significativamente por la distancia y la configuración del ancho de banda, aunque la implementación de modelos de propagación complejos presentó desafíos. Este estudio es fundamental para la presente investigación, ya que valida el uso de NS-3 como una herramienta robusta para modelar escenarios rurales donde el despliegue físico piloto es costoso.

En un contexto similar, Ferreira et al. (2023) presentaron el estudio “5G-RCOLAB: A system level simulator for 5G and beyond in rural areas”. Su objetivo fue desarrollar una herramienta de simulación de código abierto para evaluar el rendimiento de redes inalámbricas en zonas rurales, integrando capas físicas y MAC basadas en LTE adaptadas para áreas remotas. La metodología incluyó el diseño de una arquitectura por capas y la validación mediante pruebas de campo y simulación de casos de uso como eMBB y mMTC. Los resultados demostraron que la herramienta permite una evaluación precisa de tecnologías de detección de espectro y cobertura en bandas de frecuencia bajas (UHF/VHF) y medias. La relación con la investigación actual radica en la justificación del uso de simuladores a nivel de sistema (System Level Simulators) para predecir la viabilidad técnica en entornos rurales antes del despliegue.

Por otro lado, Nashiruddin et al. (2024) realizaron el estudio “Sensitivity Options of 5G 700 MHz Network Deployment in Urban Models”, enfocado en evaluar la viabilidad técnica y

económica del despliegue de redes en la banda de 700 MHz. Utilizando modelos de simulación tecno-económica y análisis de sensibilidad, los autores determinaron que la banda de 700 MHz ofrece ventajas significativas en términos de cobertura (Signal Strength - RSRP) comparada con bandas más altas, requiriendo menos estaciones base para cubrir la misma área geográfica. Sus resultados indicaron que para lograr un RSRP excelente (mayor a -90 dBm) y un SINR adecuado, la planificación de la capacidad debe considerar la densidad de usuarios. Este antecedente es crítico para nuestra investigación, ya que proporciona evidencia empírica sobre el desempeño superior de la banda de 700 MHz (B28a) propuesta para el distrito de Canchaque.

Analizando el comportamiento específico de la señal, Manap et al. (2020) llevaron a cabo el estudio "Analysis of 4G mobile network coverage in UTeM technology campus". Su objetivo fue analizar el rendimiento de cobertura de servicios celulares 4G basándose en la intensidad de la señal recibida (RSS). La metodología implicó mediciones de campo y el análisis de la distribución de la señal frente a la distancia y obstáculos. Los resultados mostraron que la presencia de edificios y la topografía causan degradación de la señal, identificando zonas ciegas críticas. Este estudio se relaciona con la presente investigación al resaltar la importancia de analizar la intensidad de señal (RSRP) y la calidad (SINR) en función de las obstrucciones geográficas, un factor clave en la orografía de Canchaque.

En cuanto a la simulación de escenarios complejos, Rodríguez Lau et al. (2022) publicaron "Escenario urbano 5G en MATLAB, desarrollo y simulación", con el fin de realizar un estudio comparativo del comportamiento de redes mediante la variación de parámetros fundamentales. Utilizaron el simulador Vienna 5G SL para modelar escenarios geométricos precisos y evaluar métricas de Throughput y SINR. Sus resultados indicaron que, aunque las frecuencias altas (ondas milimétricas) ofrecen tasas de datos superiores, sufren una atenuación severa que compromete la cobertura, a diferencia de las frecuencias bajas. Esta investigación aporta una base comparativa metodológica para entender las limitaciones de las bandas de alta frecuencia (como 2600 MHz) frente a las bajas en términos de propagación.

Finalmente, Moral-Arce et al. (2025) en su estudio "Impact evaluation of broadband investment on coverage and household internet use in rural areas", evaluaron el impacto de la inversión en infraestructura de banda ancha en zonas rurales de España. Mediante modelos econométricos y análisis de datos de cobertura, concluyeron que la inversión en infraestructura tiene un impacto directo y positivo en la disponibilidad del servicio, reduciendo la brecha digital,

aunque la adopción final depende de factores demográficos. Este estudio justifica la relevancia social y práctica de nuestra investigación, subrayando que la planificación técnica adecuada es el primer paso indispensable para el desarrollo socioeconómico de las zonas rurales como Canchaque.

1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Fundamentos de Propagación en Redes Móviles

La propagación de ondas electromagnéticas en entornos rurales es un fenómeno complejo gobernado por la interacción de la señal con la topografía y la vegetación. La viabilidad de un enlace de comunicaciones móviles depende del presupuesto de enlace (link budget), donde la potencia de la señal recibida (P_r) debe superar la sensibilidad del receptor. Según Zreikat y Mathew (2024), la capacidad y la cobertura están intrínsecamente ligadas a la frecuencia de operación; las frecuencias más bajas, como la banda de 700 MHz, presentan una menor atenuación por espacio libre y una mejor capacidad de difracción sobre obstáculos orográficos en comparación con bandas medias o altas como la de 2600 MHz.

El modelo de pérdidas de propagación es crítico para la simulación. En entornos rurales, se suelen emplear modelos empíricos ajustados. La atenuación (L) en función de la distancia (d) y la frecuencia (f) suele seguir una relación logarítmica. Estudios recientes sobre redes 4G y 5G en entornos rurales y suburbanos han validado el uso de modelos estocásticos y deterministas para predecir el RSRP (Reference Signal Received Power) y el SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) (Manap et al., 2020). Específicamente, la banda de 700 MHz (B28a) se caracteriza por su capacidad para proporcionar cobertura extensa (macro-celdas), siendo ideal para escenarios con baja densidad de usuarios dispersos en grandes áreas geográficas, mientras que la banda de 2600 MHz (B38) se utiliza típicamente para aumentar la capacidad en zonas de mayor densidad debido a su mayor ancho de banda disponible pero menor alcance (Nashiruddin et al., 2024).

1.2.2 Arquitectura de Redes LTE y 5G en Entornos Rurales

La arquitectura de red para proveer servicios de banda ancha en zonas rurales se basa en el estándar LTE-Advanced y su evolución hacia 5G. Los componentes principales simulados en NS-3 incluyen el Evolved Packet Core (EPC) y la Evolved Node B (eNodeB). Según Maslen y

Nunez (2021), la simulación efectiva requiere modelar no solo la interfaz de aire, sino también las entidades de gestión de movilidad (MME) y las pasarelas de paquetes (S-GW, P-GW) para reflejar correctamente la latencia y el throughput.

En escenarios rurales, la topología de red suele ser menos densa. La implementación de "Small Cells." celdas pequeñas se ha propuesto como una solución para mejorar la cobertura en puntos específicos de difícil acceso o para densificar la red en los núcleos poblados rurales (Jaimes-Illanes, 2021). Sin embargo, para la cobertura básica o "capa de cobertura", las macro-celdas operando en bandas bajas siguen siendo la norma. Además, la integración de redes no terrestres (NTN), como satélites de órbita baja (LEO) o plataformas de gran altitud (HAPS), está emergiendo como un complemento para extender la conectividad en áreas donde el despliegue terrestre es económicamente inviable, aunque presentan desafíos en términos de latencia y presupuesto de enlace (Feltrin et al., 2021; Plastras et al., 2024).

1.2.3 Simulación de Redes Basada en Eventos Discretos (NS-3)

La evaluación del desempeño de redes móviles mediante simulación es una práctica estándar para evitar los costos prohibitivos de las pruebas de campo. NS-3 es un simulador de redes de eventos discretos que proporciona modelos detallados de la pila de protocolos LTE y NR (New Radio). Ferreira et al. (2023) destacan que NS-3 permite configurar parámetros de la capa física (PHY) como el ancho de banda del canal, el esquema de modulación y codificación (MCS), y la potencia de transmisión, así como algoritmos de la capa MAC para la programación de recursos.

Para simular escenarios realistas, es crucial integrar modelos de movilidad que reflejen el comportamiento humano y vehicular. La herramienta SUMO (Simulation of Urban Mobility) permite generar trazas de movilidad microscópica que pueden ser importadas en NS-3. Esta integración es vital para analizar cómo la movilidad de los usuarios en la geografía accidentada de distritos como Canchaque afecta la tasa de handovers y la estabilidad de la conexión (Maslen & Nunez, 2021). Estudios recientes también han incorporado modelos de bloqueo por obstáculos (árboles, edificios, cuerpo humano) para evaluar la degradación de la señal en bandas milimétricas y medias (Utama et al., 2022), lo cual es relevante al comparar la banda de 2600 MHz.

1.2.4 Brecha Digital y Factores Socioeconómicos

La brecha digital rural no es solo un problema técnico, sino un fenómeno multidimensional. Cabrera-Castellanos et al. (2021) argumentan que la falta de infraestructura en zonas rurales ("not-spots") induce desigualdad en el acceso a oportunidades de desarrollo. La adopción de la banda ancha en estas áreas depende de la disponibilidad de la infraestructura (cobertura) y de factores socioeconómicos como el ingreso y la alfabetización digital. Modelos basados en agentes han demostrado que la dinámica de adopción es sensible al costo y a la calidad de la experiencia (QoE) percibida por el usuario (Agarwal & Canfield, 2024). Por lo tanto, la elección de la banda de frecuencia tiene implicaciones directas en la viabilidad económica del despliegue y, consecuentemente, en la inclusión digital de la población objetivo (Moral-Arce et al., 2025).

1.3 Bases Conceptuales

Para la correcta interpretación de las variables y resultados de esta investigación, se definen los siguientes términos técnicos y se operacionalizan las variables del estudio.

1.3.1 Definición de Términos Clave

RSRP (Reference Signal Received Power): Es la potencia media de las señales de referencia recibidas en el ancho de banda del sistema. Es el indicador principal para determinar la cobertura de la celda y para las decisiones de traspaso (handover). Se mide en dBm. Un valor mayor a -90 dBm se considera excelente, mientras que valores menores a -115 dBm indican cobertura pobre o nula (Nashiruddin et al., 2024).

SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio): Relación entre la potencia de la señal útil y la suma de la potencia de interferencia y el ruido de fondo. Es determinante para la capacidad del canal (throughput), ya que define el esquema de modulación y codificación (MCS) que puede utilizarse. Valores superiores a 15 dB permiten altas tasas de transferencia (Bermúdez Orozco et al., 2021).

Throughput (Caudal): Cantidad de datos transmitidos exitosamente de un punto a otro en un periodo de tiempo determinado. En redes LTE/5G, depende directamente del ancho de banda disponible y del SINR. Se mide en Mbps o Kbps.

Handover (Traspaso): Proceso mediante el cual una llamada de voz o sesión de datos se transfiere de un canal de radio a otro (entre celdas o sectores) sin interrupción del servicio,

esencial para usuarios en movilidad (Zreikat & Alabed, 2022).

Bandas de Frecuencia (B28a y B38):

- **B28a (700 MHz):** Banda de frecuencia baja caracterizada por una alta propagación y penetración en interiores, ideal para cobertura rural extensa (APT 700).
- **B38 (2600 MHz):** Banda de frecuencia media/alta (TDD) que ofrece mayor capacidad y ancho de banda, pero con menor alcance de propagación, utilizada típicamente en zonas densas o para reforzar capacidad (Rodríguez Lau et al., 2022).

1.3.2 Operacionalización de Variables

Basado en la lógica de investigación planteada, se definen las variables independientes y dependientes:

Variables Independientes:

- **Aspectos Demográficos:** Densidad poblacional, distribución de asentamientos humanos en el distrito de Canchaque. Operacionalizado en la simulación mediante la distribución de nodos (UE) en SUMO.
- **Aspectos Geográficos:** Orografía del terreno, distancia entre localidades y obstáculos naturales. Operacionalizado mediante los modelos de pérdidas de propagación en NS-3 (ej. Okumura-Hata parametrizado) y la topología de red.
- **Banda de Frecuencia:** Frecuencia central de operación configurada en el simulador: 700 MHz vs 2600 MHz.

Variables Dependientes (Indicadores de Desempeño):

- **Intensidad de Señal (RSRP):** Nivel de potencia medido en los equipos de usuario simulados.
- **Calidad de Señal (SINR):** Nivel de calidad medido considerando interferencia y ruido.
- **Alcance de Cobertura:** Radio máximo efectivo desde el eNodeB donde se mantiene un servicio mínimo aceptable.

1.4 Marco Legal y Normativo

El desarrollo de redes de telecomunicaciones se rige por estándares internacionales que garantizan la interoperabilidad y la calidad del servicio.

1.4.1 Estándares 3GPP

El *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) define las especificaciones técnicas para las redes LTE y 5G. Esta investigación se alinea con las especificaciones de la Serie 36 (E-UTRA LTE) y Serie 38 (NR 5G). Específicamente, el documento técnico TR 38.901 define los modelos de canal para frecuencias de 0.5 a 100 GHz, estableciendo parámetros para escenarios rurales (RMa - Rural Macro) que son aplicables a la simulación en Canchaque (Utama et al., 2022).

1.4.2 Normativa de Espectro

La gestión del espectro radioeléctrico es fundamental. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y los organismos nacionales regulan la asignación de bandas. La banda de 700 MHz (Dividendo Digital) ha sido reasignada globalmente de la radiodifusión a los servicios móviles para facilitar la cobertura en zonas extensas, mientras que la banda de 2600 MHz se destina principalmente a capacidad en zonas urbanas. La conformidad con estas asignaciones es crucial para la validez de los escenarios propuestos (Plastras et al., 2024).

1.4.3 Indicadores de Calidad de Servicio (QoS)

Los organismos reguladores establecen umbrales mínimos para los indicadores clave de rendimiento (KPI). Para servicios de datos, se consideran métricas como la latencia, el throughput mínimo garantizado y la disponibilidad de la red. En el contexto de esta investigación, se toman como referencia los valores umbrales de RSRP y SINR aceptados internacionalmente para considerar una zona como “cubierta” (Ubaidullah, 2022).

CAPÍTULO 2 DISEÑO METODOLÓGICO

2.1 Diseño de Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque **cuantitativo**, dado que el estudio se centró en la recolección, procesamiento y análisis de datos numéricos objetivos; tales como niveles de potencia (dBm), relación señal a ruido (dB) y tasas de transferencia (Mbps); para probar la hipótesis planteada. Este enfoque permitió medir con precisión las variables de cobertura y desempeño de la red, garantizando que los resultados fuesen generalizables y replicables, en concordancia con metodologías estandarizadas para la planificación de redes móviles donde la medición objetiva es prioritaria (Fadhila & Nashiruddin, 2021).

Por su finalidad, el estudio fue de tipo **aplicada**, ya que utilizó conocimientos teóricos existentes sobre propagación de ondas electromagnéticas y estándares de telecomunicaciones (LTE) para resolver un problema práctico y específico: la falta de conectividad en el distrito de Canchaque. La investigación no buscó generar nueva teoría fundamental, sino aplicar la tecnología de simulación para evaluar la viabilidad técnica de bandas de frecuencia específicas en un entorno geográfico complejo, siguiendo la lógica de intervención tecnológica para el cierre de brechas digitales (Moral-Arce et al., 2025).

Esta investigación se sitúa en un nivel explicativo, lo cual implica de forma intrínseca el desarrollo de las etapas precedentes de descripción y comparación para fundamentar la solidez de sus hallazgos. En primer lugar, el estudio adquiere un carácter descriptivo al caracterizar detalladamente el comportamiento de la señal en 35 localidades distintas; posteriormente, evoluciona hacia un enfoque comparativo al contrastar sistemáticamente el desempeño de las bandas de frecuencia de 700 MHz y 2600 MHz bajo condiciones controladas. Finalmente, alcanza la profundidad explicativa al establecer relaciones de causalidad entre variables independientes (frecuencia, orografía y densidad poblacional) y su impacto directo en la cobertura y calidad del sistema. Para sustentar este análisis, se empleó un diseño experimental mediante simulación computacional, utilizando las herramientas NS-3 y SUMO para manipular variables en un entorno virtual; esta metodología permitió observar los efectos sistémicos con alta precisión, mitigando los riesgos y costos de una implementación física y siguiendo prácticas validadas para la evaluación de escenarios complejos (Zreikat & Mathew, 2024).

2.2 Población y Muestra

2.2.1 Población

La población de estudio estuvo constituida por la totalidad de los centros poblados del distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura. Según el análisis demográfico realizado, esta población abarcó **62 localidades** con un total de **7 317 habitantes** y 2 978 viviendas. La población presentó una alta dispersión territorial, caracterizada por un coeficiente de variación del 167,5 %, lo que evidenció una heterogeneidad extrema con un núcleo urbano concentrado y múltiples asentamientos rurales dispersos.

2.2.2 Muestra

Se utilizó una técnica de **muestreo no probabilístico intencional (criterial)**, seleccionando una muestra representativa de **35 localidades** que agruparon una población total analizada de **6 532 habitantes**, lo que representó el 89,3 % de la población total del distrito. Los criterios de inclusión para la selección de la muestra se definieron en función de la viabilidad técnica y el impacto social, estructurándose en cuatro estratos:

- **Escenario Urbano:** Se incluyó al 100 % de las localidades urbanas (1 localidad: Canchaque Capital).
- **Escenario Semi-urbano:** Se incluyó al 100 % de las localidades con población entre 200 y 500 habitantes (5 localidades).
- **Escenario Rural:** Se incluyó al 100 % de las localidades con población entre 100 y 200 habitantes (19 localidades), consideradas el umbral mínimo de viabilidad para despliegue convencional.
- **Escenario Extremo Rural:** De las 37 localidades con menos de 100 habitantes, se seleccionó una muestra dirigida de las 10 localidades con mayor población (rango de 75 a 97 habitantes) para evaluar los límites técnicos de la cobertura.

Esta configuración muestral garantizó que los resultados fuesen extrapolables a los diferentes contextos demográficos del distrito, cubriendo desde la alta densidad del capital hasta la dispersión de las zonas periféricas.

2.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La técnica principal empleada para la recolección de datos fue la **simulación de eventos discretos** combinada con la **microsimulación de tráfico**. Este enfoque permitió generar escenarios virtuales de alta fidelidad donde se reprodujeron las condiciones de operación de la red LTE.

2.3.1 Instrumentos de Software

Se aplicaron los siguientes instrumentos de software, cuya integración constituyó la plataforma experimental del estudio:

- **NS-3 (Network Simulator 3) v3.43:** Se utilizó como el motor principal de simulación de red. Específicamente, se empleó el módulo **LENA (LTE/EPC Network Architecture)** para modelar la pila completa del protocolo LTE. Este instrumento fue esencial para configurar los parámetros de la capa física (potencia de transmisión, ancho de banda, EARFCN) y para implementar el modelo de propagación *Okumura-Hata*, validado para entornos rurales (Maslen & Nunez, 2021).
- **SUMO (Simulation of Urban Mobility) v1.25.0:** Se empleó para generar patrones de movilidad realistas. A partir de la cartografía de *OpenStreetMap*, SUMO generó trazas de movilidad (Floating Car Data - FCD) para peatones y vehículos, considerando la red vial real de cada localidad. Estas trazas alimentaron a NS-3 para actualizar dinámicamente la posición de los usuarios, superando las limitaciones de los modelos de movilidad estáticos o aleatorios simples (Bermúdez Orozco et al., 2021).
- **Scripts de Orquestación (Bash/Python):** Se desarrollaron instrumentos *ad-hoc* para la automatización del experimento. El script `ejecutar_simulaciones.sh` orquestó la ejecución paralela de las 70 simulaciones (35 localidades $\times$ 2 bandas), garantizando la consistencia en la aplicación de los parámetros de entrada.

2.3.2 Procedimientos de Aplicación

La recolección de datos se ejecutó siguiendo un flujo de trabajo secuencial riguroso:

1. **Generación de Escenarios de Movilidad:** Para cada una de las 35 localidades, se extrajo la topología vial y se generaron archivos de tráfico en SUMO con duraciones

de 3 600 segundos, diferenciando proporciones de movilidad peatonal y vehicular según el tipo de escenario (Urbano, Semi-urbano, Rural, Extremo Rural).

- 2. Integración y Simulación en NS-3:** Las trazas FCD de SUMO fueron importadas en NS-3 mediante una función de análisis sintáctico (`ParseSumoFcdTrace`) que convirtió coordenadas geográficas a cartesianas. Se configuraron dos instancias de simulación por localidad: una para la banda de 700 MHz (B28a, 10 MHz BW) y otra para 2600 MHz (B38, 20 MHz BW). Se implementaron seis perfiles de tráfico de datos (Video HD/SD, VoIP, Web, IoT, Background) para estresar la red de manera realista (Ferreira et al., 2023).
- 3. Captura de Métricas:** Se utilizaron las funciones de *tracing* nativas de NS-3 (`LteUePhy/ReportCurrentCellRsrpSinr`) para registrar, con una resolución de un segundo, los valores instantáneos de RSRP, SINR, throughput y latencia. Estos datos crudos se almacenaron en archivos CSV estructurados para su posterior procesamiento.

La validez de los instrumentos se sustentó en el uso de modelos de propagación estandarizados (3GPP) y herramientas de simulación ampliamente aceptadas en la comunidad científica para la evaluación de desempeño en redes móviles (Manap et al., 2020).

2.4 Métodos de Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de los datos recolectados se realizó utilizando librerías de ciencia de datos en **Python** (Pandas, Matplotlib, Seaborn), aplicando técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales para contrastar la hipótesis.

2.4.1 Procesamiento de Datos

Los archivos CSV generados por las 70 simulaciones fueron consolidados en una base de datos maestra. Se realizó una limpieza de datos para eliminar registros de inicialización (transitorios) y se normalizaron las métricas de potencia. Se calcularon indicadores agregados como el RSRP medio, SINR medio y porcentaje de cobertura por localidad y por escenario demográfico. La cobertura se clasificó según los umbrales del estándar 3GPP: Buena (≥ -100 dBm), Marginal (-110 a -100 dBm) y Sin Cobertura (< -120 dBm) (Nashiruddin et al., 2024).

2.4.2 Análisis Estadístico

Se aplicaron las siguientes técnicas analíticas para interpretar los resultados:

- **Análisis Comparativo (Gap Analysis):** Se cuantificaron las diferencias (Δ) de RSRP, SINR y cobertura entre la banda de 700 MHz y 2600 MHz para cada localidad. Esto permitió determinar la "ventaja técnica" de la banda baja en términos de decibelios y alcance (metros).
- **Pruebas de Significancia:** Se ejecutaron pruebas de contraste de hipótesis para determinar si las diferencias observadas entre las bandas eran estadísticamente significativas. Dado que las distribuciones de RSRP no seguían una normalidad perfecta, se validaron las diferencias obteniendo valores de $p < 0,001$ para todas las localidades, confirmando la robustez de los hallazgos.
- **Análisis de Correlación:** Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) para evaluar la relación entre las variables demográficas (población, número de viviendas, tiempo de viaje a la capital) y los indicadores de desempeño de la red. Este análisis fue fundamental para identificar que la densidad poblacional ($r = 0,690$) es el principal predictor de la viabilidad de la banda de 2600 MHz.
- **Visualización de Datos:** Se generaron mapas de calor (heatmaps) para visualizar la matriz de desempeño por localidad, diagramas de caja (boxplots) para analizar la dispersión de la señal por escenario, y gráficos de distribución acumulada (CDF) para comparar la probabilidad de cobertura entre bandas (Utama et al., 2022).

Este marco analítico permitió transformar los datos crudos de la simulación en evidencia cuantitativa sólida, demostrando que la brecha de cobertura de 47 dB a favor de los 700 MHz es estructural y determinante para la conectividad de los 4 154 habitantes que quedarían excluidos con el uso de bandas altas.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

3.1 Identificación de Aspectos Demográficos y Geográficos

El primer objetivo específico de la investigación se orientó a identificar y caracterizar los aspectos demográficos y geográficos de las localidades rurales del distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, región Piura, con la finalidad de definir escenarios de simulación representativos en SUMO (*Simulation of Urban Mobility*). La caracterización exhaustiva del territorio constituye la base fundamental sobre la cual se diseñan los escenarios de simulación que, integrados posteriormente con NS-3, permiten evaluar la cobertura de redes móviles 4G en las bandas de 700 MHz (B28a) y 2600 MHz (B38). Los datos presentados en esta sección provienen del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y del análisis geoespacial de las coordenadas de los 62 centros poblados que conforman el distrito.

3.1.1 Caracterización demográfica del distrito de Canchaque

El distrito de Canchaque está conformado por 62 centros poblados que albergan una población total de 7 317 habitantes distribuidos en 2 978 viviendas. La densidad promedio es de 118 habitantes por localidad y 48 viviendas por localidad, cifras que, sin embargo, ocultan una marcada heterogeneidad en la distribución poblacional del territorio. La Tabla 3.1 sintetiza los indicadores demográficos generales del distrito.

Tabla 3.1

Indicadores demográficos generales del distrito de Canchaque.

Indicador	Valor
Total de centros poblados	62
Población total	7 317 habitantes
Viviendas totales	2 978 viviendas
Densidad promedio	118 hab/localidad
Promedio de viviendas	48 viv/localidad

3.1.1.1 Análisis de dispersión poblacional

El análisis estadístico de la distribución poblacional reveló una alta dispersión, característica de los territorios rurales andinos del Perú. La media poblacional se sitúa en 118,0 habitantes por localidad, mientras que la mediana desciende a 88,0 habitantes, lo cual evidencia una distribución asimétrica con sesgo positivo, es decir, un número reducido de localidades concentra una proporción significativa de la población. La desviación estándar alcanza los 197,7

habitantes, lo que indica una variabilidad considerable entre los centros poblados. El indicador más revelador es el coeficiente de variación (CV), que alcanza el 167,5 %, un valor que supera ampliamente el umbral del 100 % a partir del cual se considera que la distribución presenta alta dispersión. Este resultado confirma que la población del distrito de Canchaque se distribuye de manera muy heterogénea en el territorio, con la presencia simultánea de una localidad principal densamente poblada —la capital distrital— y múltiples centros poblados pequeños y dispersos geográficamente. La Tabla 3.2 presenta los indicadores estadísticos de dispersión poblacional.

Tabla 3.2

Indicadores estadísticos de dispersión poblacional del distrito de Canchaque.

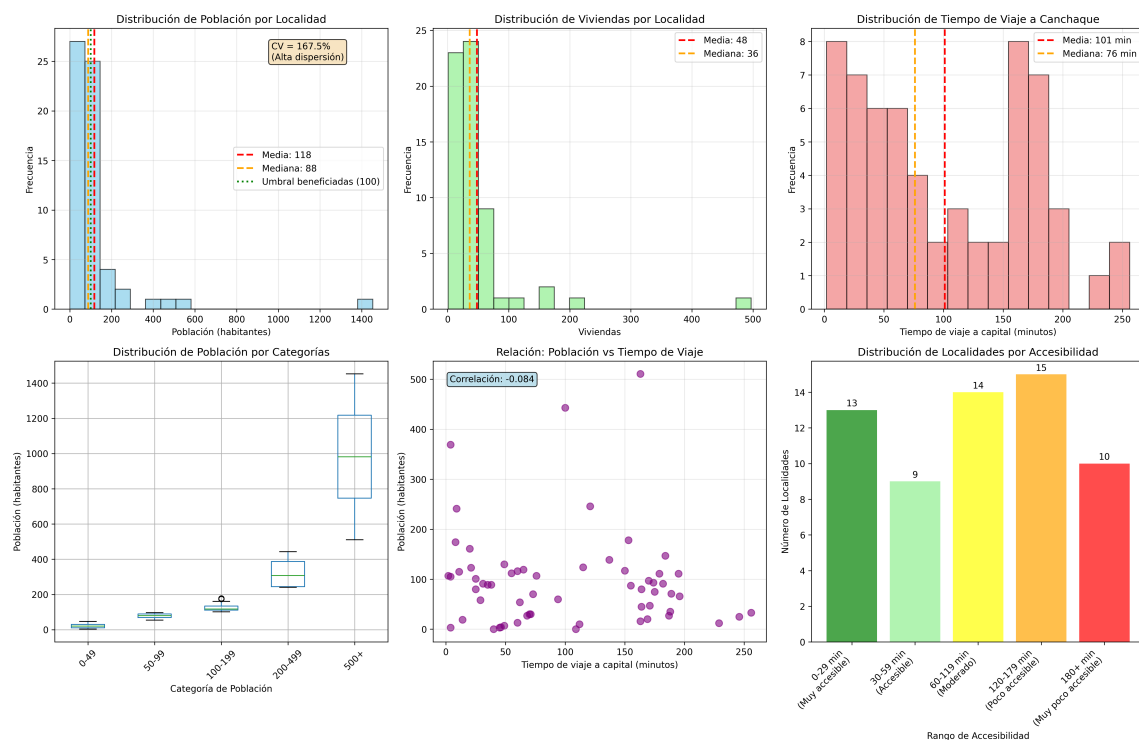
Indicador estadístico	Valor
Media poblacional	118,0 habitantes
Mediana poblacional	88,0 habitantes
Desviación estándar	197,7 habitantes
Coeficiente de variación (CV)	167,5 %
Rango poblacional	0 – 1 453 habitantes

La alta dispersión poblacional tiene implicaciones directas para el diseño de la infraestructura de telecomunicaciones, ya que descarta la posibilidad de aplicar una estrategia única de cobertura y exige, en cambio, aproximaciones diferenciadas que consideren las particularidades de cada tipo de asentamiento. La Figura 3.1 muestra la distribución poblacional mediante histogramas que ilustran tanto la frecuencia absoluta como la distribución acumulada de la población por rangos.

3.1.1.2 Distribución poblacional por categorías

La clasificación de los 62 centros poblados según rangos poblacionales permite identificar patrones de asentamiento claramente diferenciados. Como se observa en la Tabla 3.3, las localidades muy pequeñas (0–49 habitantes) representan el 33,9 % del total, pero concentran apenas el 5,5 % de la población distrital. En el otro extremo, las dos localidades muy grandes (Canchaque y Los Ranchos, con 500 o más habitantes) representan solo el 3,2 % de las localidades, pero albergan el 26,8 % de la población. Las localidades medianas (100–199 habitantes) constituyen el grupo más numeroso dentro de las que superan el umbral de viabilidad para cobertura 4G, con 19 centros poblados que concentran el 32,8 % de la población total.

Un hallazgo relevante es que el 59,7 % de las localidades (37 centros poblados) cuentan

Figura 3.1*Distribución poblacional del distrito de Canchaque***Tabla 3.3***Distribución de localidades del distrito de Canchaque por categoría poblacional.*

Categoría	Rango	N.º loc.	% Loc.	Población	% Pob.
Muy pequeñas	0–49 hab.	21	33,9 %	406	5,5 %
Pequeñas	50–99 hab.	16	25,8 %	1 251	17,1 %
Medianas	100–199 hab.	19	30,6 %	2 397	32,8 %
Grandes	200–499 hab.	4	6,5 %	1 299	17,8 %
Muy grandes	≥500 hab.	2	3,2 %	1 964	26,8 %
Total		62	100 %	7 317	100 %

con menos de 100 habitantes, lo que las sitúa en el rango de asentamientos de muy baja densidad donde la cobertura de telecomunicaciones constituye un desafío técnico y económico considerable. En contraste, solo el 9,7 % de las localidades (6 centros poblados) superan los 200 habitantes, configurando un patrón de ocupación territorial marcadamente disperso y con baja concentración poblacional.

3.1.1.3 Concentración poblacional en la capital distrital

La capital del distrito, Canchaque, presenta características demográficas significativamente diferenciadas respecto al resto del territorio. Con 1 453 habitantes y 497 viviendas, la capital concentra el 19,9 % de la población total del distrito en una sola localidad, mientras que los 5 864 habitantes restantes se distribuyen entre las 61 localidades remanentes, con un promedio de apenas 96,1 habitantes por localidad. Esta dualidad urbano-rural tiene consecuencias directas para la planificación de redes de telecomunicaciones: mientras la capital justifica el despliegue de infraestructura de mayor capacidad, las localidades rurales dispersas requieren soluciones orientadas al máximo alcance de la señal. La Tabla 3.4 cuantifica esta concentración.

Tabla 3.4

Concentración poblacional: capital Canchaque frente al resto del distrito.

Aspecto	Capital Canchaque	Resto del distrito
Población	1 453 (19,9 %)	5 864 (80,1 %)
Localidades	1	61
Promedio poblacional	1 453	96,1 hab.
Viviendas	497	2 481

3.1.1.4 Identificación de localidades con viabilidad para cobertura 4G

Para efectos de la presente investigación, se identificaron las localidades que cumplen el criterio de viabilidad para el despliegue de cobertura 4G, definido como aquellas con una población igual o superior a 100 habitantes. Bajo este criterio, 25 localidades —que representan el 40,3 % del total de centros poblados— califican como beneficiadas, concentrando 5 660 habitantes (77,4 % de la población distrital) y 2 165 viviendas (72,7 % del total). La población promedio de estas localidades asciende a 226,4 habitantes. La Tabla 3.5 presenta las 10 localidades de mayor población.

No obstante, cabe señalar que las 37 localidades con menos de 100 habitantes, aunque no

Tabla 3.5

Las 10 localidades de mayor población del distrito de Canchaque.

Rank	Centro poblado	Pob.	Viv.	Latitud	Longitud
1	Canchaque (Capital)	1 453	497	−5,3759	−79,6057
2	Los Ranchos	511	212	−5,2275	−79,6454
3	Coyona	443	154	−5,3040	−79,6201
4	Palambla	369	157	−5,3886	−79,6091
5	San Francisco	246	84	−5,2961	−79,6493
6	Los Potreros	241	101	−5,3620	−79,6047
7	Cashupampa	178	50	−5,2939	−79,6094
8	La Paccha	174	66	−5,3843	−79,6009
9	Huabal	161	65	−5,4056	−79,6552
10	Huajambe Alto	147	60	−5,2275	−79,6245

alcanzan el umbral de viabilidad individual, representan en conjunto el 22,6 % de la población distrital (1 657 habitantes). La exclusión de estos asentamientos ampliaría la brecha digital existente en el distrito, lo que motivó la inclusión de una muestra representativa de 10 localidades de este segmento —correspondientes a las de mayor población dentro de la categoría de extremo rural— en los escenarios de simulación, a fin de evaluar la factibilidad técnica de extender la cobertura a estos asentamientos mediante la banda de 700 MHz.

3.1.2 Caracterización geográfica del distrito de Canchaque

3.1.2.1 Ubicación y extensión territorial

El distrito de Canchaque se ubica en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, dentro de la provincia de Huancabamba, región Piura. Su extensión territorial abarca aproximadamente 520 km², comprendidos entre las latitudes −5,417395 y −5,181133 (una extensión norte-sur de aproximadamente 26,2 km) y las longitudes −79,722553 y −79,543905 (una extensión este-oeste de aproximadamente 19,8 km). La topografía del distrito es predominantemente montañosa y accidentada, con presencia de valles estrechos, laderas pronunciadas, mesetas y un sistema hidrográfico conformado por quebradas y ríos estacionales. Estas características topográficas tienen un impacto directo en la propagación de señales de radiofrecuencia, ya que el relieve irregular genera zonas de sombra, atenuación por difracción y variaciones en la línea de vista entre el equipo transmisor (eNodeB) y los usuarios.

3.1.2.2 *Análisis de accesibilidad geográfica*

La accesibilidad geográfica, expresada como el tiempo de viaje terrestre desde cada localidad hasta la capital distrital, constituye un indicador relevante del grado de aislamiento de los centros poblados. El análisis de los tiempos de viaje revela que el tiempo promedio de desplazamiento desde las localidades del distrito hasta Canchaque es de 101,0 minutos (1,7 horas), con una mediana de 76,0 minutos. El rango de tiempos es considerable: desde apenas 2 minutos para las localidades más cercanas (Santa Rosa, La Esperanza) hasta 256 minutos (4,3 horas) para las más remotas (Chacchacal). La desviación estándar de 72,4 minutos confirma una variabilidad sustancial en la accesibilidad, lo cual incide en los patrones de movilidad de la población y, consecuentemente, en la demanda de servicios de telecomunicaciones.

La Tabla 3.6 presenta la distribución de las localidades según su nivel de accesibilidad a la capital distrital. El 41,0 % de las localidades (25 centros poblados) presentan un acceso limitado, requiriendo más de 2 horas de viaje para llegar a la capital. Este conjunto de localidades, que alberga al 42,3 % de la población, se encuentra en condiciones de aislamiento que hacen indispensable la provisión de cobertura de telecomunicaciones local, dado que sus habitantes no pueden depender de los servicios disponibles exclusivamente en la capital.

Tabla 3.6

Distribución de localidades según nivel de accesibilidad a la capital distrital.

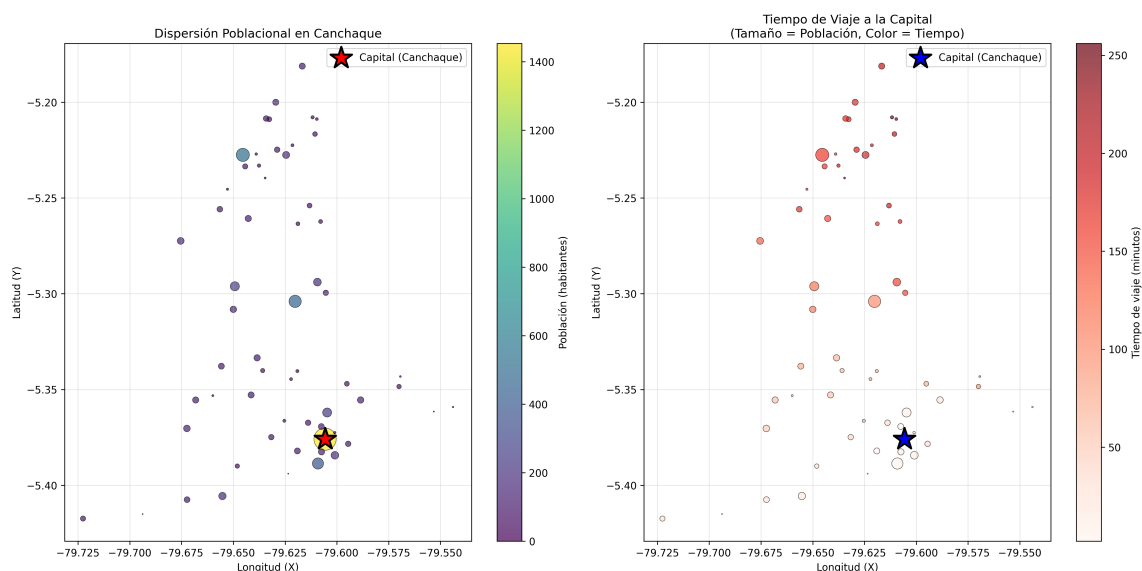
Nivel	Rango (min)	N.º loc.	% Loc.	Pob.	% Pob.
Muy accesible	0–29	13	21,3 %	1 656	28,2 %
Accesible	30–59	9	14,8 %	525	9,0 %
Moderadamente accesible	60–119	14	23,0 %	1 203	20,5 %
Poco accesible	120–179	15	24,6 %	1 862	31,8 %
Muy poco accesible	≥180	10	16,4 %	618	10,5 %
Total		61	100 %	5 864	100 %

Un resultado adicional de interés es que el coeficiente de correlación entre la población de las localidades y su tiempo de viaje a la capital es de $r = -0,084$, un valor que indica una correlación prácticamente nula. Esto significa que la distribución poblacional en el distrito no sigue un patrón gravitacional respecto a la capital; es decir, las localidades más pobladas no se ubican necesariamente más cerca de Canchaque, lo que refuerza la necesidad de una cobertura distribuida en todo el territorio.

La Figura 3.2 presenta la distribución geográfica de las localidades del distrito, con indicación de los tiempos de viaje y la clasificación por escenarios.

Figura 3.2

Distribución geográfica de las localidades del distrito de Canchaque



3.1.3 Definición de escenarios de simulación para SUMO

Con base en el análisis demográfico y geográfico desarrollado en las secciones precedentes, se definieron cuatro escenarios de simulación que representan la diversidad de condiciones presentes en el distrito de Canchaque. Cada escenario fue configurado con parámetros específicos de área de simulación, número de usuarios, patrones de movilidad y características ambientales que reflejan las condiciones reales observadas en cada tipo de asentamiento. La definición de estos escenarios responde a la pregunta específica PE1 de la investigación: *¿Cuáles son las características demográficas y geográficas relevantes de las localidades rurales del distrito de Canchaque que influyen en la cobertura de redes móviles?*

3.1.3.1 Escenario 1: Urbano concentrado

El primer escenario corresponde a la capital distrital Canchaque, la única localidad clasificada como urbana en el distrito. Con 1 453 habitantes y 497 viviendas concentrados en un área relativamente compacta, Canchaque representa el caso de mayor densidad poblacional del distrito. El área de simulación fue definida en 2×2 km, con un total de 30 usuarios simulados y una altura de eNodeB de 40 m. Los patrones de movilidad configurados en SUMO reflejan una

distribución modal de 70 % peatonal (velocidades de 3–7 km/h) y 30 % vehicular (velocidades de 15–25 km/h), con áreas de concentración en el centro poblado, el mercado y las instituciones públicas. Este escenario sirve como referencia para evaluar la capacidad y calidad de servicio bajo condiciones de demanda relativamente alta en el contexto del distrito.

3.1.3.2 Escenario 2: Semi-urbano

El segundo escenario agrupa cinco localidades con poblaciones entre 200 y 511 habitantes: Los Ranchos (511 hab.), Coyona (443 hab.), Palambla (369 hab.), San Francisco (246 hab.) y Los Potreros (241 hab.). Estas localidades, con una población promedio de 362 habitantes, presentan una concentración intermedia que justifica tanto la cobertura local como la conectividad inter-localidades. El área de simulación se estableció en 3×3 km por localidad, con 25 usuarios simulados y una altura de eNodeB de 35 m. La movilidad en este escenario se caracteriza por una distribución de 80 % peatonal (2–5 km/h) y 20 % vehicular (20–30 km/h), con un 10 % de usuarios que realizan desplazamientos inter-localidades. Las distancias entre las localidades de este escenario oscilan entre 3 y 8 km.

3.1.3.3 Escenario 3: Rural

El tercer escenario comprende 19 localidades con poblaciones entre 101 y 178 habitantes, que constituyen el grupo más numeroso dentro de las localidades con viabilidad para cobertura 4G. La población promedio de este escenario es de 126 habitantes, con un total de 2 397 habitantes distribuidos en una amplia extensión del territorio distrital. El área de simulación fue ampliada a 4×4 km para reflejar la mayor dispersión de los asentamientos, con 20 usuarios simulados por localidad y una altura de eNodeB de 50 m. Los patrones de movilidad son predominantemente peatonales (90 %) con velocidades de 1–3 km/h, y solo el 5 % de los usuarios se desplaza hacia otras localidades. Los tiempos de viaje a la capital desde las localidades de este escenario varían entre 2 y 195 minutos. Este escenario representa el caso de prueba principal de la investigación, dado que constituye la situación más frecuente en el distrito y donde la elección de la banda de frecuencia tiene el mayor impacto potencial.

3.1.3.4 Escenario 4: Extremo rural

El cuarto escenario abarca las localidades con menos de 100 habitantes, que suman 37 centros poblados y representan el 59,7 % de las localidades del distrito. Para la simulación se seleccionó una muestra representativa de 10 localidades, correspondientes a las de mayor población dentro de este segmento: Soccha Baja (97 hab.), Sapce (93 hab.), Huajambe Bajo (91 hab.), Pusmalca (91 hab.), Las Lomas de Agua Azul (89 hab.), Yumbe (89 hab.), Shuturumbe (87 hab.), Hualtacal (80 hab.), Papayal Bajo (80 hab.) y Chamelico (75 hab.). La población promedio de la muestra es de 87 habitantes. El área de simulación se extendió a 6×6 km para capturar la máxima dispersión de estos asentamientos, con 15 usuarios simulados y una altura de eNodeB de 60 m. La movilidad es casi exclusivamente peatonal (95 %), con velocidades de 1–2 km/h, y apenas el 2 % de los usuarios se desplaza inter-localidades. Este escenario representa el caso más desafiante para la cobertura 4G y permite evaluar los límites de efectividad de cada banda bajo condiciones de máxima dispersión y aislamiento.

3.1.3.5 Resumen de la configuración de escenarios

La Tabla 3.7 sintetiza los parámetros de los cuatro escenarios de simulación definidos a partir de la caracterización demográfica y geográfica del distrito de Canchaque. En conjunto, los cuatro escenarios cubren 35 localidades que representan el 56,5 % de los centros poblados y el 89,3 % de la población del distrito (6 532 habitantes), lo que confiere alta representatividad a las simulaciones realizadas.

Tabla 3.7

Resumen de los escenarios de simulación definidos para SUMO a partir del análisis demográfico y geográfico del distrito de Canchaque.

Parámetro	Urbano	Semi-urb.	Rural	Ext. rural
N.º de localidades	1	5	19	10
Rango poblacional	1 453	241–511	101–178	75–97
Población total (hab.)	1 453	1 810	2 397	872
Pob. promedio (hab.)	1 453	362	126	87
Área de simulación	2×2 km	3×3 km	4×4 km	6×6 km
Usuarios simulados	30	25	20	15
Altura eNodeB (m)	40	35	50	60
% movilidad peatonal	70 %	80 %	90 %	95 %
% movilidad vehicular	30 %	20 %	10 %	5 %

3.1.4 Localidades simuladas por escenario

La Tabla 3.8 presenta el listado completo de las 35 localidades incluidas en la simulación, organizadas por escenario demográfico, con sus respectivos datos poblacionales, coordenadas geográficas y tiempos de viaje a la capital distrital.

Tabla 3.8

Localidades incluidas en la simulación, organizadas por escenario demográfico.

ID	Escenario	Localidad	Pob.	Viv.	Lat.	Long.	T (min)
Escenario 1: Urbano concentrado							
1	Urbano	Canchaque	1 453	497	−5,376	−79,606	0
Escenario 2: Semi-urbano							
2	Semi-urbano	Los Ranchos	511	212	−5,227	−79,645	163
3	Semi-urbano	Coyona	443	154	−5,304	−79,620	100
4	Semi-urbano	Palambla	369	157	−5,389	−79,609	4
5	Semi-urbano	San Francisco	246	84	−5,296	−79,649	121
6	Semi-urbano	Los Potreros	241	101	−5,362	−79,605	9
Escenario 3: Rural							
7	Rural	Cashupampa	178	50	−5,294	−79,609	153
8	Rural	La Paccha	174	66	−5,384	−79,601	8
9	Rural	Huabal	161	65	−5,406	−79,655	20
10	Rural	Huajambe Alto	147	60	−5,228	−79,625	184
11	Rural	San Martín de Pajonal	139	54	−5,272	−79,675	137
12	Rural	Huarapos	130	51	−5,370	−79,672	49
13	Rural	Silia o Cilia	124	44	−5,308	−79,650	115
14	Rural	Pampa de las Minas	123	47	−5,355	−79,589	21
15	Rural	Vaquería	119	47	−5,333	−79,638	65
16	Rural	Soccha Alta	117	47	−5,261	−79,643	150
17	Rural	Yahuanduz	116	63	−5,355	−79,668	60

Continúa en la siguiente página

(Continuación de la Tabla 3.8)

ID	Escenario	Localidad	Pob.	Viv.	Lat.	Long.	T (min)
18	Rural	San Martín	115	47	-5,383	-79,607	11
19	Rural	Maraypampa	112	59	-5,353	-79,641	55
20	Rural	Flor de Café	111	41	-5,181	-79,617	195
21	Rural	La Virgen	111	54	-5,200	-79,630	179
22	Rural	Laguna del Toro	107	34	-5,338	-79,656	76
23	Rural	Santa Rosa	107	57	-5,382	-79,619	2
24	Rural	La Esperanza	105	38	-5,369	-79,607	4
25	Rural	Pueblo Libre	101	36	-5,408	-79,672	25
Escenario 4: Extremo rural (muestra representativa)							
26	Ext. rural	Soccha Baja	97	40	-5,256	-79,656	170
27	Ext. rural	Sapce	93	50	-5,209	-79,634	174
28	Ext. rural	Huajambe Bajo	91	42	-5,225	-79,629	182
29	Ext. rural	Pusmalca	91	42	-5,367	-79,614	31
30	Ext. rural	Las Lomas de Agua Azul	89	42	-5,375	-79,632	38
31	Ext. rural	Yumbe	89	42	-5,378	-79,595	35
32	Ext. rural	Shuturumbe	87	27	-5,300	-79,605	155
33	Ext. rural	Hualtacal	80	36	-5,417	-79,723	25
34	Ext. rural	Papayal Bajo	80	38	-5,234	-79,644	164
35	Ext. rural	Chamelico	75	35	-5,209	-79,633	175

3.1.5 Implicaciones para la cobertura de redes móviles 4G

La caracterización demográfica y geográfica del distrito de Canchaque permite identificar un conjunto de desafíos estructurales que condicionan el desempeño de las redes móviles 4G en el territorio y que, en consecuencia, determinan la pertinencia de evaluar bandas de frecuencia con características de propagación diferenciadas.

En primer lugar, la alta dispersión poblacional, confirmada por un coeficiente de variación del 167,5 %, implica que no existe una solución tecnológica única capaz de atender eficientemente la totalidad del territorio. Las condiciones de demanda, densidad y accesibilidad

varían radicalmente entre la capital (1 453 habitantes en un núcleo compacto) y las localidades extremo rurales (menos de 100 habitantes dispersos en áreas extensas), lo que exige una evaluación comparativa de las bandas de frecuencia disponibles para cada contexto.

En segundo lugar, la extensión territorial de aproximadamente 520 km² y la topografía montañosa del distrito favorecen, desde un punto de vista teórico, el uso de frecuencias bajas para las zonas rurales, dado que la banda de 700 MHz presenta menores pérdidas de propagación en espacio libre, mejor capacidad de difracción sobre obstáculos topográficos y mayor alcance de cobertura. En contraste, la banda de 2600 MHz, aunque ofrece mayor capacidad de transmisión de datos, presenta una atenuación más rápida con la distancia y menor capacidad de penetración en entornos con obstáculos, lo que podría limitar su efectividad en los escenarios rurales y extremo rurales identificados.

En tercer lugar, el análisis de accesibilidad muestra que el 41 % de las localidades requiere más de dos horas de viaje para llegar a la capital, lo que refuerza la necesidad de proveer cobertura de telecomunicaciones local e independiente en cada zona, en lugar de depender exclusivamente de la infraestructura ubicada en la capital.

Finalmente, la ausencia de correlación significativa entre la población de las localidades y su proximidad a la capital ($r = -0,084$) confirma que el patrón de asentamiento del distrito no sigue una lógica gravitacional respecto al centro urbano principal, sino que responde a factores históricos, agrícolas y culturales propios de las comunidades andinas. Este hallazgo refuerza la necesidad de una cobertura territorialmente distribuida.

3.2 Resultados del Objetivo Específico 2: Diseño de Escenarios de Simulación en NS-3 Integrados con SUMO

El segundo objetivo específico de la investigación se orientó al diseño e implementación de escenarios de simulación en NS-3 (*Network Simulator 3*), versión 3.43, integrados con SUMO (*Simulation of Urban Mobility*), versión 1.25.0, para las bandas de frecuencia de 700 MHz (B28a) y 2600 MHz (B38), considerando patrones de movilidad representativos del distrito de Canchaque. Los escenarios de simulación se construyeron sobre la base de la caracterización demográfica y geográfica desarrollada en el OE1, de modo que cada escenario refleja las particularidades de densidad poblacional, distribución espacial y patrones de desplazamiento identificados en las localidades rurales del distrito. En esta sección describimos la arquitectura de simulación desarrollada, la configuración técnica de cada banda de frecuencia, el diseño de los cuatro escenarios, la integración de los patrones de movilidad desde SUMO hacia NS-3, los perfiles de tráfico implementados y el sistema de orquestación automatizada que permitió ejecutar las 70 simulaciones requeridas ($35 \text{ localidades} \times 2 \text{ bandas de frecuencia}$).

3.2.1 Arquitectura del sistema de simulación NS-3/SUMO

La plataforma de simulación desarrollada integra dos simuladores de propósito específico: SUMO, para la generación de patrones de movilidad realistas basados en la topología vial real del territorio, y NS-3, para la simulación del comportamiento de la red LTE incluyendo la capa física, la capa de acceso al medio, el núcleo de red evolucionado (*Evolved Packet Core*, EPC) y las aplicaciones de tráfico de datos. La integración entre ambos simuladores se realizó mediante el mecanismo de trazas *Floating Car Data* (FCD) exportadas por SUMO en formato XML, las cuales fueron consumidas por los programas de simulación NS-3 a través de una función de análisis sintáctico (`ParseSumoFcdTrace`) que convierte las coordenadas geográficas (latitud/longitud) a coordenadas cartesianas en metros mediante una proyección equirectangular, tomando como punto de referencia la posición de la estación base (eNodeB) de cada localidad.

La arquitectura del sistema, ilustrada en la Figura 3.3, comprende los siguientes componentes funcionales. En el subsistema SUMO, la herramienta `netconvert` transforma los datos de OpenStreetMap (OSM) en una red vial compatible con el simulador; la herramienta `randomTrips.py` genera viajes aleatorios para peatones y vehículos con parámetros diferen-

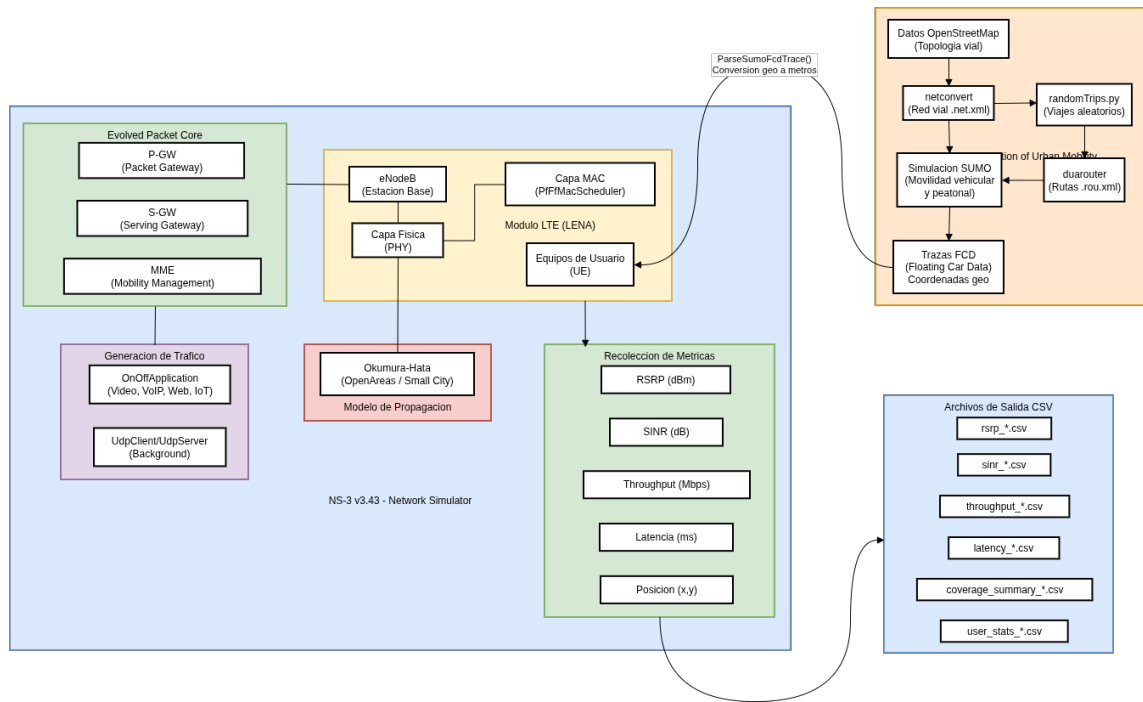


Figura 3.3

Arquitectura del sistema de simulación integrado NS-3/SUMO

ciados por escenario; y *duarouter* calcula las rutas óptimas sobre la red vial. La ejecución de SUMO produce las trazas FCD que contienen la posición, velocidad y ángulo de cada agente móvil a intervalos de un segundo. En el subsistema NS-3, el módulo LENA (*LTE/EPC Network Architecture*) proporciona la pila completa del estándar LTE, incluyendo la capa física con el modelo de propagación Okumura-Hata configurado para áreas rurales abiertas, la capa MAC con el planificador *Proportional Fair* (PF), y el EPC con los elementos P-GW (*Packet Data Network Gateway*) y S-GW (*Serving Gateway*). La conexión entre el EPC y un servidor remoto se estableció mediante un enlace punto a punto de 100 Gbps con una latencia de 10 ms, valores que garantizan que el cuello de botella de la simulación resida exclusivamente en la interfaz de radio.

3.2.2 Configuración técnica de las bandas de frecuencia

Se implementaron dos programas de simulación independientes en lenguaje C++ para las bandas de 700 MHz y 2600 MHz, respectivamente. Ambos programas comparten la misma estructura arquitectónica, los mismos escenarios de simulación y los mismos mecanismos de recolección de métricas, con el fin de garantizar que las diferencias observadas en los

resultados se atribuyan exclusivamente a las características de propagación de cada banda y no a discrepancias en la configuración de la simulación.

3.2.2.1 Banda de 700 MHz (B28a – APT)

La banda de 700 MHz se configuró conforme a la especificación de la banda 28a del estándar 3GPP, también conocida como APT 700 (*Asia-Pacific Telecommunity*), la cual opera en modo FDD (*Frequency Division Duplex*) con una separación dúplex de 45 MHz. El enlace descendente (DL) se configuró con un EARFCN (*E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number*) de 9410, que corresponde a una frecuencia portadora de aproximadamente 778 MHz dentro del rango de 758–803 MHz asignado para el enlace descendente de la banda 28. El ancho de banda del canal se estableció en 10 MHz, equivalente a 50 bloques de recursos (*Resource Blocks*, RBs) según la especificación LTE. La Tabla 3.9 resume los parámetros de configuración de la banda de 700 MHz.

Tabla 3.9

Parámetros de configuración de la simulación para la banda de 700 MHz (B28a).

Parámetro	Atributo NS-3	Valor
Banda 3GPP	–	B28a (APT 700)
Modo de duplexado	–	FDD
EARFCN DL	LteEnbNetDevice::DlEarfcn	9410
Frecuencia portadora DL	–	≈778 MHz
Ancho de banda	LteEnbNetDevice::DlBandwidth	50 RBs (10 MHz)
Potencia de transmisión eNB	LteEnbPhy::TxPower	43 dBm (20 W)
Potencia de transmisión UE	LteUePhy::TxPower	23 dBm (200 mW)
Figura de ruido eNB	LteEnbPhy::NoiseFigure	5 dB
Figura de ruido UE	LteUePhy::NoiseFigure	9 dB
Modelo de antena	IsotropicAntennaModel	Omnidireccional

La selección de la banda de 700 MHz responde a sus propiedades de propagación favorables para entornos rurales: la menor frecuencia implica una longitud de onda mayor ($\lambda \approx 0,43$ m), lo cual reduce la atenuación por propagación en espacio libre, mejora la difracción alrededor de obstáculos topográficos y permite alcanzar radios de cobertura significativamente mayores que las bandas de frecuencia superiores. Estas características resultan particularmente relevantes en un territorio como Canchaque, donde la orografía accidentada y la dispersión de los centros poblados demandan un amplio alcance de la señal desde cada emplazamiento de estación base.

3.2.2.2 Banda de 2600 MHz (B38)

La banda de 2600 MHz se configuró conforme a la especificación de la banda 38 del estándar 3GPP, la cual opera originalmente en modo TDD (*Time Division Duplex*) en el rango de 2570–2620 MHz. Dado que el módulo LENA de NS-3 v3.43 soporta exclusivamente el modo FDD, se adoptó la aproximación documentada en la literatura de utilizar el EARFCN correcto de la banda 38 (valor 37900, correspondiente a una frecuencia portadora de aproximadamente 2585 MHz) sobre la infraestructura FDD del simulador. Esta aproximación preserva la frecuencia portadora real —y por tanto las características de propagación asociadas— a costa de no modelar la asimetría temporal propia del esquema TDD. El ancho de banda se configuró en 20 MHz (100 RBs), valor que refleja la mayor disponibilidad espectral de esta banda. La Tabla 3.10 detalla los parámetros de configuración.

Tabla 3.10

Parámetros de configuración de la simulación para la banda de 2600 MHz (B38).

Parámetro	Atributo NS-3	Valor
Banda 3GPP	–	B38
Modo de duplexado	–	TDD (emulado como FDD)
EARFCN DL	LteEnbNetDevice::DlEarfcn	37900
Frecuencia portadora	–	≈2585 MHz
Ancho de banda	LteEnbNetDevice::DlBandwidth	100 RBs (20 MHz)
Potencia de transmisión eNB	LteEnbPhy::TxPower	43 dBm (20 W)
Potencia de transmisión UE	LteUePhy::TxPower	23 dBm (200 mW)
Figura de ruido eNB	LteEnbPhy::NoiseFigure	5 dB
Figura de ruido UE	LteUePhy::NoiseFigure	9 dB
Modelo de antena	IsotropicAntennaModel	Omnidireccional

Es relevante destacar que se mantuvo la misma potencia de transmisión (43 dBm en el eNB y 23 dBm en el UE), la misma figura de ruido y el mismo tipo de antena omnidireccional para ambas bandas. Esta decisión de diseño garantiza que las diferencias de desempeño observadas entre las bandas se deban exclusivamente a la frecuencia portadora y al ancho de banda del canal, factores que afectan directamente la pérdida de trayectoria (*path loss*) calculada por el modelo de propagación y la capacidad espectral del enlace.

3.2.3 Modelo de propagación

Para ambas bandas de frecuencia se seleccionó el modelo de propagación Okumura-Hata en su variante para áreas abiertas (`ns3::OkumuraHataPropagationLossModel` con `Environment=OpenAreas` y `CitySize=Small`), implementado nativamente en NS-3. El modelo Okumura-Hata constituye un modelo empírico ampliamente validado para la estimación de la pérdida de trayectoria en sistemas celulares operando en el rango de frecuencias de 150 MHz a 2000 MHz, con extensiones documentadas hasta 3000 MHz. La pérdida de trayectoria en áreas abiertas se calcula mediante la expresión:

$$L_{\text{rural}} = L_{\text{urbano}} - 4,70 \cdot (\log_{10} f)^2 + 18,33 \cdot \log_{10} f - 40,94 \quad (3.1)$$

donde L_{urbano} corresponde a la pérdida de trayectoria en el modelo urbano base:

$$L_{\text{urbano}} = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10}(f) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) + [44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_b)] \cdot \log_{10}(d) - C_H \quad (3.2)$$

siendo f la frecuencia portadora en MHz, h_b la altura de la antena de la estación base en metros, d la distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros, y C_H el factor de corrección por la altura del terminal móvil. La elección de un modelo de propagación idéntico para ambas bandas garantiza la comparabilidad de los resultados, ya que la diferencia en la pérdida de trayectoria entre las bandas de 700 MHz y 2600 MHz queda determinada exclusivamente por el término de frecuencia en las ecuaciones (3.1) y (3.2). A mayor frecuencia, el término $26,16 \cdot \log_{10}(f)$ produce valores de pérdida de trayectoria superiores, lo cual se traduce en una menor intensidad de señal recibida a igual distancia.

3.2.4 Diseño de los escenarios de simulación

A partir de la clasificación demográfica desarrollada en el OE1, se diseñaron cuatro escenarios de simulación que representan el gradiente de densidad poblacional y dispersión geográfica identificado en el distrito de Canchaque. Cada escenario define un conjunto de parámetros que determinan la configuración de la infraestructura de red, el número de usuarios, el área de cobertura, la altura de la estación base y los patrones de movilidad. La Tabla 3.11

sintetiza los parámetros de configuración de los cuatro escenarios.

Tabla 3.11

Parámetros de configuración de los cuatro escenarios de simulación.

Parámetro	E1: Urbano	E2: Semi-urbano	E3: Rural	E4: Rural ext.
Rango poblacional	≥1 000 hab.	200–500 hab.	100–200 hab.	<100 hab.
N.º de localidades	1	5	19	10 (muestra)
N.º de usuarios (UE)	30	25	20	15
Área de simulación (km ²)	4 (2×2)	9 (3×3)	16 (4×4)	36 (6×6)
Densidad de usuarios (UE/km ²)	7,5	2,8	1,25	0,42
Altura del eNB (m)	40	35	50	60
% movilidad peatonal	70 %	80 %	90 %	95 %
% movilidad vehicular	30 %	20 %	10 %	5 %
Vel. peatonal (km/h)	3–7	2–5	1–3	1–2
Vel. vehicular (km/h)	15–25	20–30	25–35	30–40

3.2.4.1 Escenario 1: Urbano concentrado (Canchaque capital)

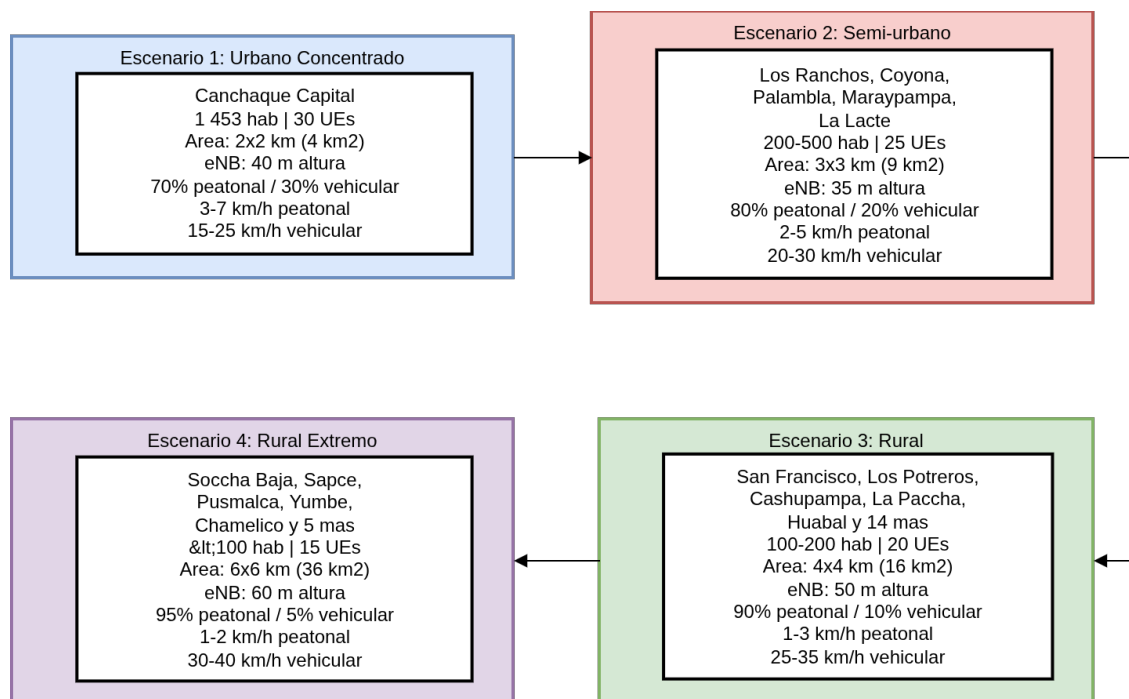
El primer escenario representa la capital distrital de Canchaque, la localidad más poblada del distrito con 1 453 habitantes. El área de simulación se definió en 2 km × 2 km (4 km²), con la estación base ubicada en el centro geométrico del área a una altura de 40 m. Se configuraron 30 equipos de usuario (UE), lo que resulta en una densidad de 7,5 UE/km². Los usuarios se distribuyeron inicialmente en un radio de 500 a 1 500 m respecto de la posición de la estación base, concentración que refleja el patrón de asentamiento observado en la capital distrital. Los patrones de movilidad se configuraron con un 70 % de desplazamientos peatonales (3–7 km/h) y un 30 % de desplazamientos vehiculares (15–25 km/h), proporciones consistentes con la dinámica de la localidad que cuenta con acceso vehicular a través de la carretera que conecta Canchaque con la ciudad de Huancabamba.

3.2.4.2 Escenario 2: Semi-urbano (localidades medianas)

El segundo escenario representa las cinco localidades con población entre 200 y 500 habitantes: Los Ranchos, Coyona, Palambra, Maraypampa y La Lacte. El área de simulación se amplió a 3 km × 3 km (9 km²), con la estación base posicionada en el centro del área a una altura de 35 m. Se configuraron 25 UE (densidad de 2,8 UE/km²), distribuidos de forma más dispersa que en el escenario urbano, con posiciones iniciales comprendidas entre 300 y 2 700 m respecto de la estación base. La movilidad se configuró con un 80 % peatonal (2–5 km/h) y un 20 %

Figura 3.4

Resumen visual de los cuatro escenarios de simulación diseñados para el distrito de Canchaque



vehicular (20–30 km/h), reflejando una menor presencia vehicular y velocidades peatonales más moderadas asociadas a las actividades agrícolas predominantes en estas localidades.

3.2.4.3 Escenario 3: Rural (localidades pequeñas)

El tercer escenario agrupa las 19 localidades con población entre 100 y 200 habitantes, que representan el 30,6 % de los centros poblados del distrito y concentran el 32,8 % de la población total. El área de simulación se estableció en 4 km × 4 km (16 km²), con la estación base a 50 m de altura, valor incrementado para compensar la topografía accidentada y ampliar la cobertura sobre un área más extensa. Se configuraron 20 UE (densidad de 1,25 UE/km²), distribuidos entre 200 y 3 800 m respecto de la estación base. La movilidad se configuró con un 90 % peatonal (1–3 km/h) y un 10 % vehicular (25–35 km/h), proporciones que reflejan la predominancia de los desplazamientos a pie y la presencia esporádica de vehículos motorizados (principalmente motocicletas) en estas localidades.

3.2.4.4 Escenario 4: Rural extremo (localidades muy pequeñas)

El cuarto escenario representa las localidades con menos de 100 habitantes, que constituyen el 59,7 % de los centros poblados del distrito. Se seleccionó una muestra representativa de 10 localidades —Soccha Baja, Sapce, Huajambe Bajo, Pusmalca, Las Lomas de Agua Azul, Yumbe, Shuturumbe, Hualtaca, Papayal Bajo y Chamelico— correspondientes a las de mayor población dentro de esta categoría. El área de simulación se amplió a $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ (36 km^2), con la estación base a 60 m de altura. Se configuraron 15 UE (densidad de $0,42 \text{ UE/km}^2$), distribuidos entre 100 y 5 900 m respecto de la estación base, reflejando la máxima dispersión poblacional observada en estas localidades. La movilidad se configuró con un 95 % peatonal ($1\text{--}2 \text{ km/h}$) y un 5 % vehicular ($30\text{--}40 \text{ km/h}$). En este escenario, las velocidades peatonales son las más bajas de todos los escenarios, lo que refleja los desplazamientos por caminos de herradura y senderos no pavimentados, e incluso se modelaron tipos de vehículo como caballos y mulas con velocidades de $2,2 \text{ km/h}$ y $1,7 \text{ km/h}$ respectivamente, elementos representativos del transporte rural en la zona.

3.2.5 Generación de escenarios de movilidad en SUMO

La generación de los escenarios de movilidad en SUMO se automatizó mediante un *script* de orquestación (`generar_escenarios_sumo.sh`) que procesa las 35 localidades del estudio a partir del archivo de coordenadas geográficas (`coordenadas_localidades_canchaque.csv`). Para cada localidad, el proceso de generación comprende seis etapas secuenciales.

En la primera etapa, se descargan los datos de la red vial desde la API de OpenStreetMap, utilizando un *bounding box* centrado en las coordenadas geográficas de la localidad. El radio del *bounding box* varía según el tipo de escenario: 0,009 grados ($\approx 1 \text{ km}$) para el escenario urbano, 0,0135 grados ($\approx 1,5 \text{ km}$) para el semi-urbano, 0,018 grados ($\approx 2 \text{ km}$) para el rural y 0,027 grados ($\approx 3 \text{ km}$) para el rural extremo, valores que corresponden a la mitad del lado del área de simulación de cada escenario.

En la segunda etapa, los datos OSM se convierten a la red vial de SUMO mediante la herramienta `netconvert`, que genera el archivo `.net.xml` con la topología de calles, intersecciones y aceras. En la tercera etapa se generan los polígonos de edificaciones y áreas de uso del suelo mediante `polyconvert`. Las etapas cuarta y quinta generan los viajes peatonales y vehiculares, respectivamente, utilizando la herramienta `randomTrips.py` con la opción

--pedestrians para los peatones y la opción --fringe-factor 5 para los vehículos, garantizando que los viajes vehiculares partan o terminen en los bordes de la red. La proporción entre peatones y vehículos se ajusta según el escenario, conforme a los valores indicados en la Tabla 3.11. En la sexta etapa se combinan las rutas peatonales y vehiculares en un único archivo de rutas (.rou.xml) junto con los tipos de vehículos (vTypes) parametrizados con las velocidades correspondientes a cada escenario.

La ejecución de SUMO con la configuración generada produce el archivo de trazas FCD (.xml), que registra la posición geográfica (latitud, longitud), la velocidad y el ángulo de cada agente móvil a intervalos de un segundo durante 3 600 segundos (una hora). Estas trazas constituyen la entrada principal para la actualización dinámica de las posiciones de los equipos de usuario en la simulación NS-3.

3.2.6 Integración de la movilidad SUMO en NS-3

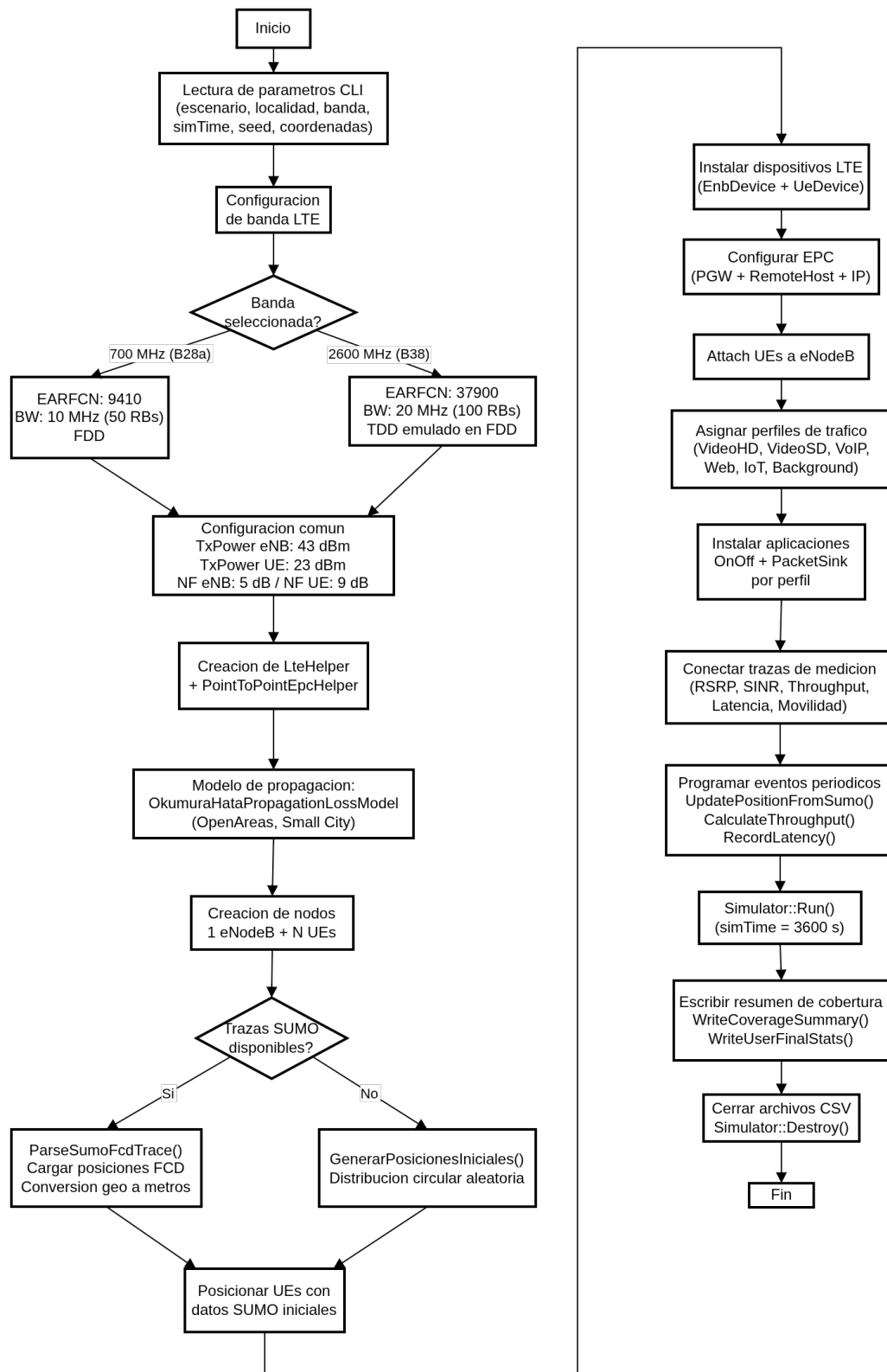
La integración de los datos de movilidad generados por SUMO en el entorno de simulación NS-3 se implementó mediante un mecanismo de lectura de trazas FCD y actualización periódica de posiciones. Este mecanismo, implementado en los archivos `lte_canchaque_700mhz_sumo.cc` y `lte_canchaque_2600mhz_sumo.cc`, opera en tres fases: carga de trazas, conversión de coordenadas e interpolación temporal.

En la fase de carga, la función `ParseSumoFcdTrace()` lee el archivo FCD en formato XML y extrae, para cada instante de tiempo, el identificador del agente móvil (vehículo o peatón), sus coordenadas geográficas (x = longitud, y = latitud), su velocidad y su ángulo de dirección. Los datos se almacenan en un mapa indexado por el identificador del agente (`mobilityTraces`), lo que permite asociar cada agente SUMO con un nodo UE de NS-3 mediante el mapa `vehicleToNodeId`.

En la fase de conversión de coordenadas, cuando se proporcionan las coordenadas geográficas de la estación base (`enbLat`, `enbLon`) a través de la línea de comandos, se activa la conversión de coordenadas geográficas a metros mediante una proyección equirectangular. La función `GeoToMeters()` calcula las coordenadas cartesianas ($\Delta x, \Delta y$) en metros a partir de las diferencias de longitud y latitud respecto del punto de referencia (posición del eNB), utilizando las expresiones:

Figura 3.5

Diagrama de flujo del proceso de simulación NS-3 integrado con trazas de movilidad SUMO, desde la lectura de parámetros hasta la generación de archivos de resultados.



$$\Delta x = (\lambda - \lambda_{\text{ref}}) \cdot \frac{\pi}{180} \cdot R_{\oplus} \cdot \cos(\varphi_{\text{ref}}) + x_{\text{offset}} \quad (3.3)$$

$$\Delta y = (\varphi - \varphi_{\text{ref}}) \cdot \frac{\pi}{180} \cdot R_{\oplus} + y_{\text{offset}} \quad (3.4)$$

donde λ y φ representan la longitud y latitud del punto en grados, λ_{ref} y φ_{ref} las coordenadas del punto de referencia (eNB), $R_{\oplus} = 6371\,000$ m el radio medio de la Tierra, y x_{offset} e y_{offset} los desplazamientos que posicionan al eNB en el centro del área de simulación. Esta proyección es adecuada para áreas menores a 10 km, condición que se cumple en todos los escenarios definidos.

En la fase de interpolación temporal, la función `UpdatePositionFromSumo()` se invoca cada segundo durante la simulación mediante `Simulator::Schedule()`. Para cada agente con trazas disponibles, la función localiza los dos puntos temporales más cercanos al tiempo actual de simulación y realiza una interpolación lineal para obtener la posición intermedia:

$$x(t) = x(t_i) + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \cdot [x(t_{i+1}) - x(t_i)] \quad (3.5)$$

donde t_i y t_{i+1} son los instantes temporales inmediatamente anterior y posterior al tiempo actual t en las trazas SUMO. La posición interpolada se asigna al nodo UE correspondiente a través del modelo de movilidad `ConstantPositionMobilityModel` de NS-3, que permite la actualización dinámica de la posición sin generar eventos de movilidad intermedios.

3.2.7 Perfiles de tráfico de datos

A diferencia de las versiones básicas de la simulación —que emplean un modelo de tráfico uniforme basado en paquetes UDP de tamaño fijo a intervalos constantes—, las versiones integradas con SUMO incorporan un sistema de perfiles de tráfico diferenciados que reproduce la diversidad de servicios y aplicaciones que los usuarios rurales utilizan en una red 4G. Se definieron seis perfiles de tráfico, cada uno con parámetros específicos de tasa de datos, tamaño de paquete, distribución temporal ON/OFF y dirección del flujo. La asignación de perfiles a los usuarios se realiza de forma probabilística conforme a las proporciones indicadas en la Tabla 3.12.

Cada perfil se implementó utilizando la aplicación `OnOffApplication` de NS-3, con-

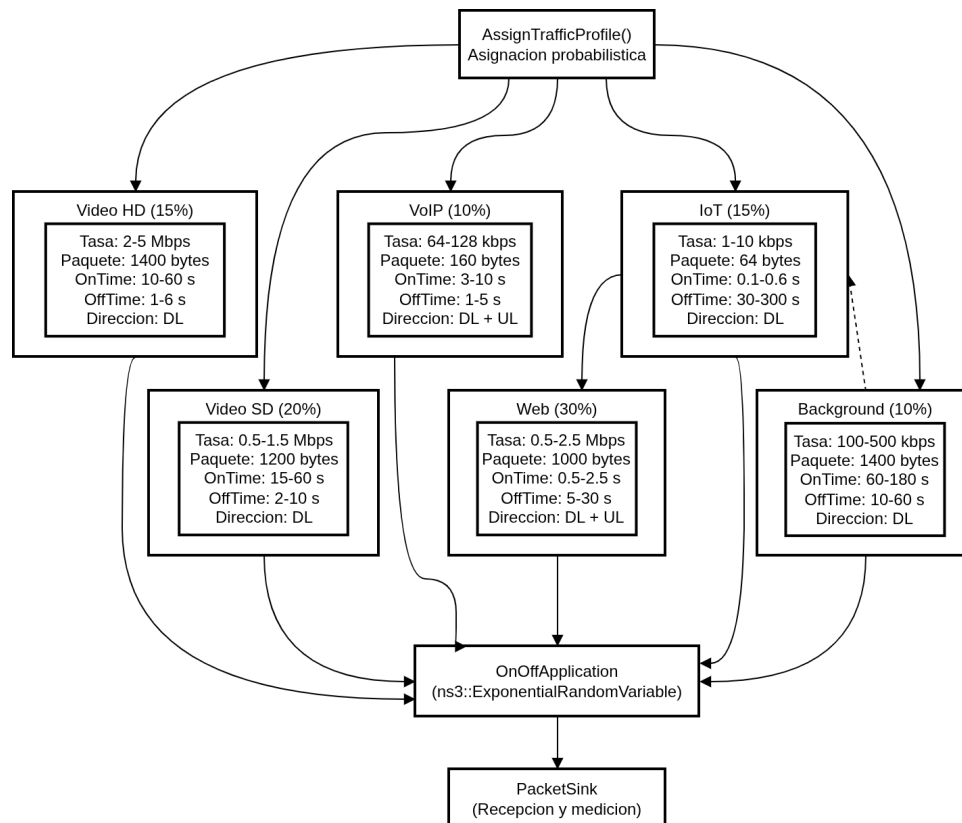
Tabla 3.12

Perfiles de tráfico implementados en la simulación, con las probabilidades de asignación y los parámetros de configuración de cada perfil.

Perfil	Prob.	Tasa de datos	Paquete	ON/OFF (s)	Dirección
Video HD	15 %	2–5 Mbps	1 400 B	10–60 / 1–6	DL
Video SD	20 %	0,5–1,5 Mbps	1 200 B	15–60 / 2–10	DL
VoIP	10 %	64–128 kbps	160 B	3–10 / 1–5	DL+UL
Web	30 %	0,5–2,5 Mbps	1 000 B	0,5–2,5 / 5–30	DL+UL
IoT	15 %	1–10 kbps	64 B	0,1–0,6 / 30–300	DL
Background	10 %	100–500 kbps	1 400 B	60–180 / 10–60	DL

Figura 3.6

Estructura de los perfiles de tráfico implementados en la simulación, con las probabilidades de asignación y la distribución ON/OFF utilizada para modelar la intermitencia del tráfico.



figurada con distribuciones exponenciales (`ns3::ExponentialRandomVariable`) para los tiempos de actividad (ON) e inactividad (OFF). Los parámetros de tasa de datos, tamaño de paquete y tiempos ON/OFF se aleatorizan dentro de los rangos indicados en la Tabla 3.12 mediante un generador de números aleatorios con semilla configurable, lo que introduce variabilidad realista entre los usuarios sin comprometer la reproducibilidad de los resultados. Los perfiles de VoIP y Web generan tráfico bidireccional (DL y UL), mientras que los demás perfiles generan tráfico exclusivamente en el enlace descendente (DL). El perfil IoT fue incluido para representar las potenciales aplicaciones de agricultura de precisión y monitoreo ambiental relevantes para la actividad cafetalera y agrícola del distrito.

3.2.8 Sistema de recolección de métricas

El sistema de recolección de métricas se diseñó para capturar de forma sistemática los indicadores de cobertura y calidad de servicio requeridos por los objetivos específicos OE3 y OE4. Se implementaron funciones de *callback* conectadas a las trazas del módulo LTE de NS-3, que registran las métricas en archivos CSV con formato tabular. La Tabla 3.13 describe las métricas recolectadas, los mecanismos de captura y los archivos de salida correspondientes.

Tabla 3.13

Métricas recolectadas durante la simulación, mecanismos de captura y archivos de salida.

Métrica	Unidad	Mecanismo NS-3	Archivo
RSRP	dBm	LteUePhy/ReportCurrentCellRsrpSinr	rsrp_*.csv
SINR	dB	LteUePhy/ReportCurrentCellRsrpSinr	rsrp_*.csv
SINR (eNB)	dB	LteEnbPhy/ReportUeSinr	sinr_*.csv
Throughput DL	Mbps	PacketSink::GetTotalRx()	throughput_*.csv
Latencia	ms	FlowMonitor	latency_*.csv
Posición	(x, y) m	MobilityModel::GetPosition()	mobility_*.csv

La RSRP (*Reference Signal Received Power*) se obtiene a partir de la traza `ReportCurrentCellRsrpSinr` del módulo de capa física del UE, que reporta la potencia en unidades lineales (watts). La conversión a dBm se realiza mediante la expresión $RSRP_{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(RSRP_W) + 30$. La SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) se captura simultáneamente desde la misma traza y se convierte a decibelios. Adicionalmente, el sistema clasifica cada medición de RSRP según los umbrales de cobertura definidos por el 3GPP: cobertura buena (≥ -100 dBm), marginal (-110 a -100 dBm), de borde (-120 a -110 dBm) y sin cobertura (< -120 dBm). Las

métricas se registran con un intervalo de muestreo configurable (por defecto, 1 segundo) para mantener un tamaño de archivos manejable sin perder resolución temporal significativa.

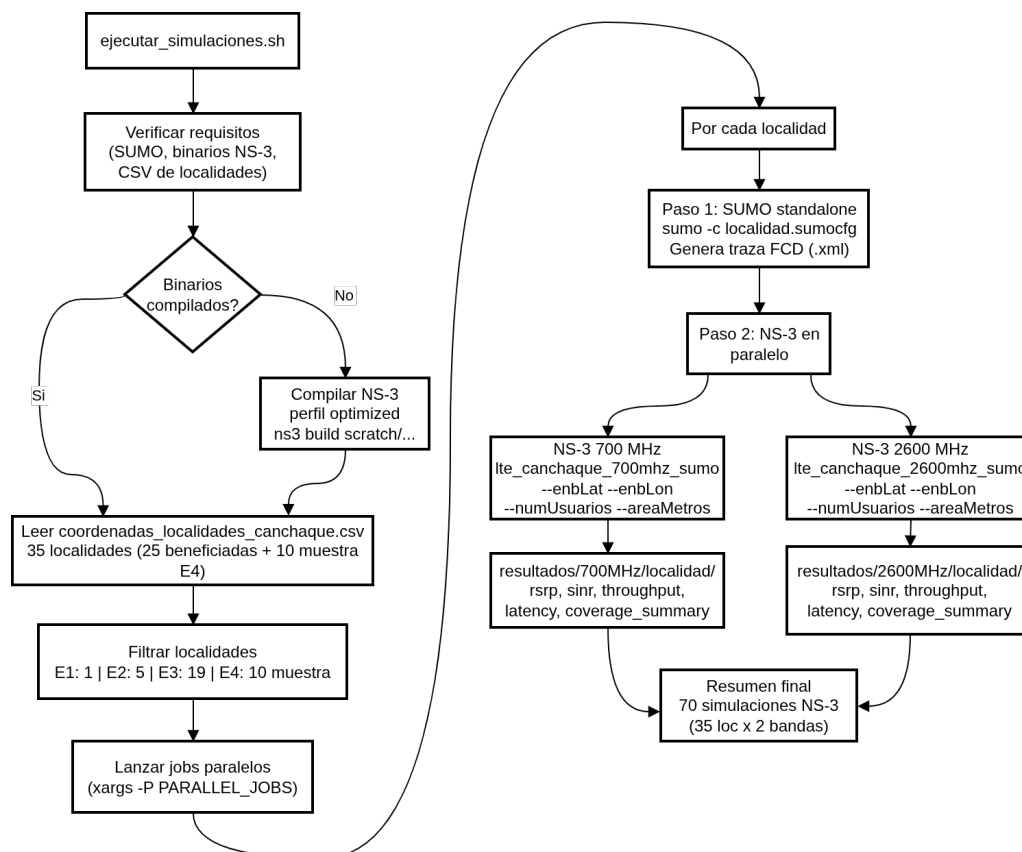
Al finalizar la simulación, la función `WriteCoverageSummary()` genera un archivo de resumen consolidado (`coverage_summary_*.csv`) que contiene las estadísticas agregadas de cada simulación: número total de usuarios, distribución por categoría de cobertura, valores medio, mínimo y máximo de RSRP y SINR, rango máximo de cobertura en metros y porcentaje de usuarios con cobertura efectiva (buena + marginal).

3.2.9 Sistema de orquestación automatizada

La ejecución de las 70 simulaciones requeridas (35 localidades $\times$ 2 bandas) se gestionó mediante un sistema de orquestación automatizada implementado en el *script* `ejecutar_simulaciones.sh`. Este sistema coordina la ejecución secuencial de SUMO para la generación de trazas FCD y la ejecución paralela de las simulaciones NS-3 para ambas bandas de frecuencia.

Figura 3.7

Diagrama del sistema de orquestación automatizada para la ejecución de las 70 simulaciones NS-3



El *script* de orquestación lee el archivo CSV de coordenadas de las localidades y, para cada una, ejecuta tres etapas: (i) la generación de la traza FCD mediante SUMO standalone (etapa secuencial por localidad); (ii) la simulación NS-3 para la banda de 700 MHz; y (iii) la simulación NS-3 para la banda de 2600 MHz. Las etapas (ii) y (iii) se ejecutan simultáneamente para cada localidad mediante procesos en segundo plano (*background*), y se procesan hasta cuatro localidades en paralelo mediante `xargs -P` (configurable mediante la variable de entorno `PARALLEL_JOBS`). Con cuatro localidades simultáneas, el sistema lanza hasta ocho procesos NS-3 concurrentes. Cada simulación se ejecuta con un tiempo de simulación de 3 600 s (una hora), un intervalo de muestreo de 1 s y una semilla aleatoria de 42.

Los programas NS-3 se compilaron en perfil optimizado (`--build-profile=optimized`) para maximizar la velocidad de ejecución. Los parámetros de cada localidad —identificador de escenario, coordenadas geográficas del eNB, número de usuarios, tamaño del área y altura de la antena— se pasan como argumentos de línea de comandos, lo que permite que el mismo binario compilado se reutilice para todas las localidades de cada escenario. Los resultados se organizan en un directorio jerárquico (`resultados/{700MHz, 2600MHz}/localidad/`) que facilita el análisis posterior.

3.2.10 Parámetros generales de simulación

La Tabla 3.14 resume los parámetros generales compartidos por todas las simulaciones, tanto para la versión básica (sin movilidad) como para la versión integrada con SUMO.

El planificador MAC *Proportional Fair* (`PfFfMacScheduler`) se seleccionó por su capacidad para balancear la eficiencia espectral global con la equidad en la asignación de recursos entre usuarios. Este planificador asigna los bloques de recursos en cada TTI (*Transmission Time Interval*) al usuario que maximiza la relación entre la tasa instantánea alcanzable y la tasa promedio histórica, lo cual favorece a los usuarios en condiciones de canal temporalmente favorables sin dejar de atender a los usuarios con señal débil. Esta propiedad resulta especialmente relevante en los escenarios rurales, donde coexisten usuarios cercanos a la estación base (con señal fuerte) y usuarios lejanos (con señal débil) que requieren acceso a los recursos de red.

Tabla 3.14

Parámetros generales de simulación compartidos por ambas bandas y todos los escenarios.

Parámetro	Descripción	Valor
Tiempo de simulación	Duración total	3 600 s (1 hora)
Versión de NS-3	Simulador de red	3.43
Versión de SUMO	Simulador de movilidad	1.25.0
Modelo de propagación	<i>Path loss</i>	Okumura-Hata (OpenAreas)
Planificador MAC	Asignación de recursos	<i>Proportional Fair</i>
Modelo de antena	Patrón de radiación	Isotrópico (omnidireccional)
Intervalo de muestreo	Resolución de métricas	1 s
Paso temporal SUMO	Resolución de movilidad	1 s
Semilla aleatoria	Reproducibilidad	42
Enlace <i>backhaul</i>	Conexión EPC–Internet	100 Gbps, 10 ms
Total de localidades	E1+E2+E3+E4	35
Total de simulaciones	35 localidades × 2 bandas	70

3.2.11 Consideraciones y limitaciones del diseño

El diseño de los escenarios de simulación presenta las siguientes limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, la banda de 2600 MHz (B38) opera nativamente en modo TDD, pero el módulo LENA de NS-3 v3.43 solo soporta FDD. La emulación de la frecuencia portadora mediante el EARFCN correcto preserva las características de propagación pero no modela la asimetría temporal del esquema TDD. En segundo lugar, el modelo de propagación Okumura-Hata no incorpora información topográfica detallada del terreno (modelos digitales de elevación), por lo que la atenuación adicional provocada por la orografía montañosa de Canchaque no se refleja directamente en los resultados, aunque la configuración de áreas abiertas (*OpenAreas*) y ciudad pequeña (*Small*) se seleccionó precisamente para representar un entorno con baja densidad de obstáculos artificiales. En tercer lugar, se empleó un modelo de antena isotrópico para todos los escenarios, lo cual simplifica la configuración pero no refleja las ganancias direccionales que se obtendrían con antenas sectoriales en despliegues reales. Estas simplificaciones son consistentes con las limitaciones inherentes a la versión del simulador utilizada y se documentan con transparencia para facilitar la interpretación y la replicabilidad del estudio.

3.3 Indicadores de Cobertura Móvil

El tercer objetivo específico se orientó a determinar los indicadores de cobertura móvil para las bandas de 700 MHz (B28a) y 2600 MHz (B38) en los escenarios simulados del distrito de Canchaque. Se ejecutaron 70 simulaciones en NS-3 integrado con SUMO (35 localidades $\times$ 2 bandas de frecuencia), cada una con una duración de 3 600 segundos y seis perfiles de tráfico diferenciados. Los indicadores evaluados comprenden la potencia de referencia de la señal recibida (RSRP), la relación señal a interferencia más ruido (SINR), el porcentaje de cobertura según la clasificación 3GPP, el alcance máximo de la estación base y el throughput por perfil de tráfico. Los resultados permiten responder las preguntas específicas PE2 y PE3 formuladas en el diseño de la investigación.

3.3.1 Indicadores globales de cobertura

El análisis consolidado de las 35 localidades evidenció una diferencia sustancial entre ambas bandas. La banda de 700 MHz registró un RSRP medio global de $-79,7$ dBm, mientras que la banda de 2600 MHz alcanzó $-126,7$ dBm, lo que representa una diferencia de $47,0$ dB a favor de la frecuencia más baja. En términos de calidad de señal, el SINR medio fue de $43,6$ dB para 700 MHz frente a $-3,4$ dB para 2600 MHz. Estos valores posicionan a la banda de 700 MHz consistentemente dentro de la categoría “Buena cobertura” según la clasificación 3GPP ($\text{RSRP} \geq -100$ dBm), mientras que la banda de 2600 MHz se ubica mayoritariamente en la categoría “Sin cobertura” ($\text{RSRP} < -120$ dBm).

El porcentaje de cobertura promedio fue del $100,0$ % para 700 MHz en la totalidad de las localidades, frente a un $18,3$ % para 2600 MHz, lo que configura una brecha de $81,7$ puntos porcentuales. El alcance medio de la estación base resultó de $2\,603$ m para 700 MHz y 674 m para 2600 MHz, lo que implica que la banda de 700 MHz ofrece un radio de cobertura $3,9$ veces mayor. La Tabla 3.15 sintetiza estos indicadores.

3.3.2 Análisis por tipo de escenario demográfico

La segmentación de los resultados según los cuatro escenarios demográficos definidos en el OE1 permitió identificar la progresión del deterioro de la señal de 2600 MHz conforme disminuye la densidad poblacional y aumenta el área de cobertura requerida. La Tabla 3.16 presenta los indicadores promedio por escenario para ambas bandas.

Tabla 3.15*Indicadores globales de cobertura para ambas bandas.*

Indicador	700 MHz (B28a)	2600 MHz (B38)	Diferencia
RSRP medio (dBm)	-79,7	-126,7	47,0 dB
SINR medio (dB)	43,6	-3,4	47,0 dB
Cobertura media (%)	100,0	18,3	81,7 pp
Alcance medio (m)	2 603	674	×3,9

Tabla 3.16*Indicadores de cobertura por escenario demográfico.*

Escenario	RSRP (dBm)		SINR (dB)		Cob. (%)		Alcance (m)	
	700	2600	700	2600	700	2600	700	2600
Urbano	-59,6	-106,6	63,6	16,6	100,0	73,3	1 900	1 900
Semi-urbano	-64,8	-111,8	58,5	11,5	100,0	48,8	1 707	1 334
Rural	-80,0	-127,0	43,2	-3,8	100,0	16,3	2 588	549
Extremo rural	-88,5	-135,5	34,8	-12,3	100,0	1,3	3 148	456

3.3.2.1 Escenario urbano

En la capital distrital de Canchaque (1 453 habitantes, área de 4 km²), la banda de 700 MHz alcanzó un RSRP de -59,6 dBm y un SINR de 63,6 dB, valores que la sitúan en el rango de cobertura óptima. La banda de 2600 MHz registró un RSRP de -106,6 dBm, ubicándose en la categoría “Marginal” de la clasificación 3GPP, con un porcentaje de cobertura del 73,3 %. Este resultado indica que, incluso en el escenario más favorable, la banda de 2600 MHz no logra cobertura total, y un 26,7 % de los usuarios se encuentran en zona sin cobertura. El alcance de la estación base fue idéntico para ambas bandas (1 900 m), lo que se explica por la concentración de usuarios dentro de la zona de servicio del eNodeB en un área relativamente compacta.

3.3.2.2 Escenario semi-urbano

Las cinco localidades semi-urbanas (Los Ranchos, Coyona, Palambla, San Francisco y Los Potrerros; 200–511 habitantes cada una) presentaron un RSRP medio de -64,8 dBm para 700 MHz y -111,8 dBm para 2600 MHz. La cobertura de 2600 MHz descendió al 48,8 % en promedio, con un rango que osciló entre el 28,0 % (Los Potrerros) y el 76,0 % (Coyona). La dispersión entre localidades sugiere que factores como la distribución espacial de los usuarios y

la distancia al eNodeB influyen significativamente en el rendimiento de la banda alta. El SINR medio de 2600 MHz fue de 11,5 dB, un valor positivo que aún permite demodulación, aunque con esquemas de modulación de bajo orden.

3.3.2.3 Escenario rural

Las 19 localidades rurales (100–178 habitantes, área de 16 km² por localidad) constituyen el grupo más numeroso del estudio. La banda de 700 MHz mantuvo un RSRP medio de –80,0 dBm, todavía dentro de la categoría “Buena”, con un SINR de 43,2 dB que garantiza comunicación confiable. En contraste, la banda de 2600 MHz registró un RSRP de –127,0 dBm, por debajo del umbral de cobertura (–120 dBm), con una cobertura media de apenas el 16,3 %. El alcance de 2600 MHz se redujo a 549 m, frente a los 2 588 m de 700 MHz. En 13 de las 19 localidades rurales, la cobertura de 2600 MHz fue del 10 %, correspondiente únicamente a los usuarios ubicados en las proximidades inmediatas de la estación base.

3.3.2.4 Escenario extremo rural

El escenario más desfavorable agrupa 10 localidades con poblaciones inferiores a 100 habitantes y áreas de servicio de 36 km². El RSRP medio de 700 MHz fue de –88,5 dBm, aún dentro de la categoría “Buena”, mientras que el de 2600 MHz descendió a –135,5 dBm. La cobertura media de 2600 MHz resultó del 1,3 %, con 8 de las 10 localidades registrando 0,0 % de cobertura. El SINR medio de –12,3 dB para 2600 MHz indica que la señal es indetectable para la mayoría de los equipos terminales en estos entornos. La banda de 700 MHz, en cambio, alcanzó un radio de cobertura promedio de 3 148 m, suficiente para abarcar las áreas de dispersión poblacional típicas de estos asentamientos.

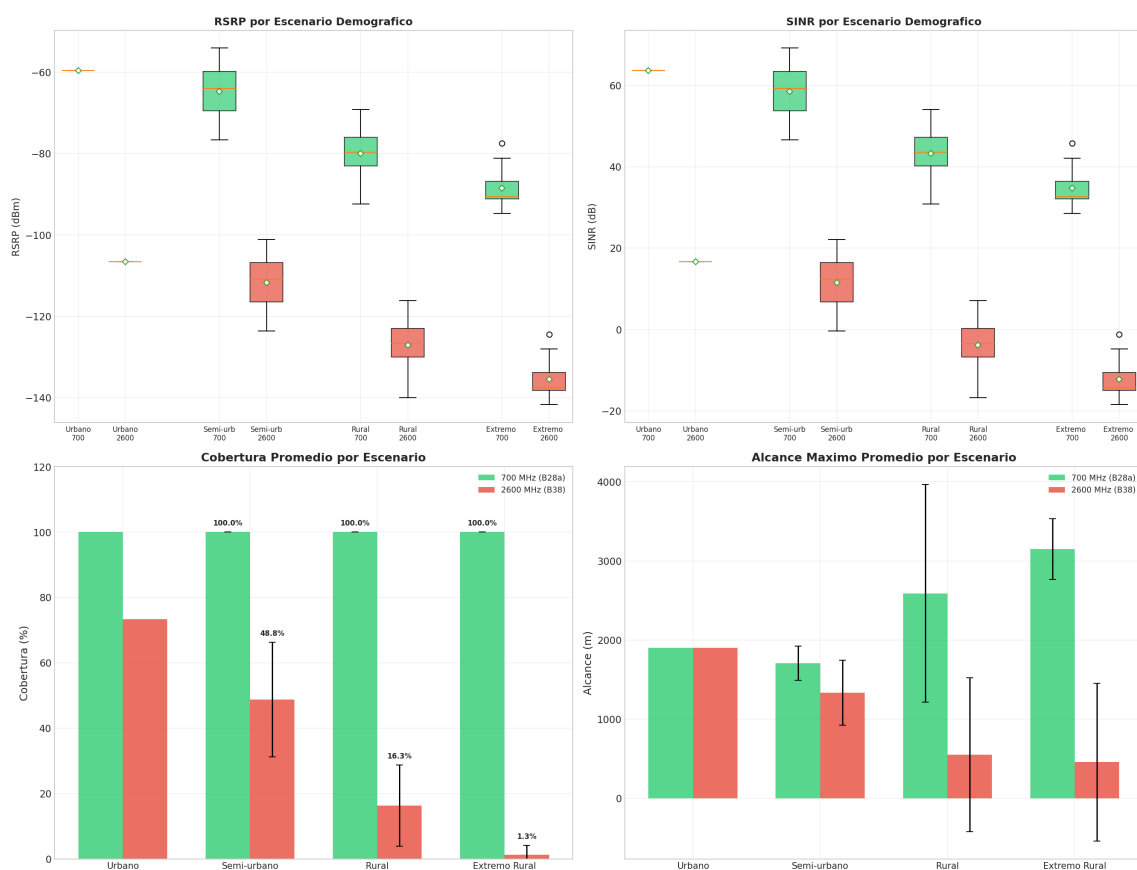
La Figura 3.8 ilustra la distribución de los indicadores RSRP y SINR por escenario demográfico, donde se aprecia el incremento progresivo de la brecha entre ambas bandas conforme el escenario se torna más rural.

3.3.3 Clasificación de cobertura según 3GPP

La clasificación de las muestras de RSRP según los umbrales definidos en la especificación técnica 3GPP TS 36.214 permite categorizar la calidad del enlace en cuatro niveles: “Buena” ($\text{RSRP} \geq -100$ dBm), “Marginal” ($-110 \leq \text{RSRP} < -100$ dBm), “Borde de celda”

Figura 3.8

Distribución de RSRP y SINR por escenario demográfico.



($-120 \leq \text{RSRP} < -110 \text{ dBm}$) y “Sin cobertura” ($\text{RSRP} < -120 \text{ dBm}$). La Tabla 3.17 presenta la distribución porcentual de muestras por categoría y escenario.

Tabla 3.17

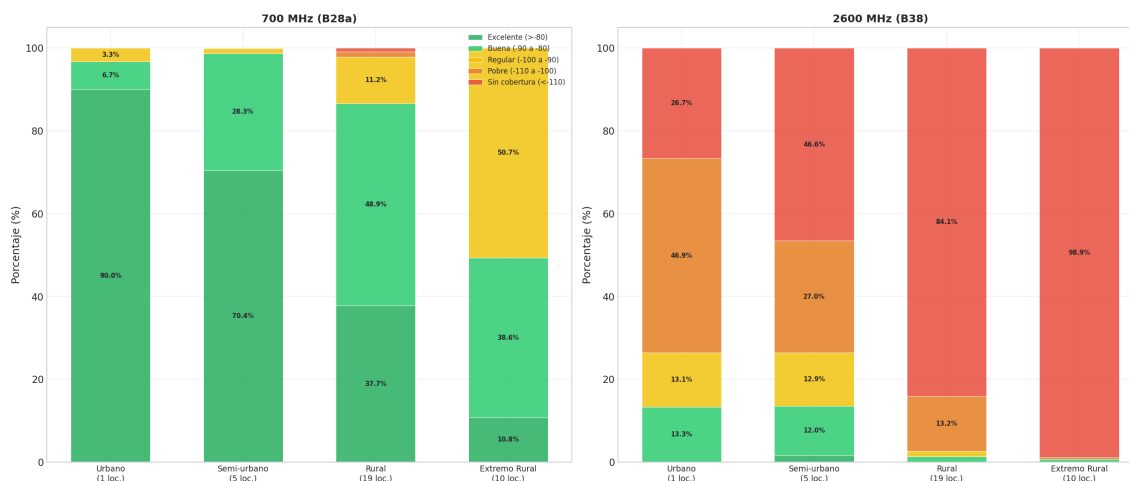
Clasificación de cobertura 3GPP por escenario y banda.

Escenario	Banda	Buena	Marginal	Borde	Sin cob.
Urbano	700 MHz	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	2600 MHz	73,3 %	—	—	26,7 %
Semi-urbano	700 MHz	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	2600 MHz	48,8 %	—	—	51,2 %
Rural	700 MHz	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	2600 MHz	16,3 %	—	—	83,7 %
Extremo rural	700 MHz	100,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	2600 MHz	1,3 %	—	—	98,7 %

La Figura 3.9 complementa esta clasificación con una representación visual apilada por escenario, donde se aprecia cómo la proporción de muestras en la categoría “Sin cobertura” para 2600 MHz crece de manera sostenida desde el escenario urbano hasta el extremo rural.

Figura 3.9

Clasificación 3GPP de muestras RSRP por escenario.



3.3.4 Análisis por localidad

El análisis individualizado de las 35 localidades reveló patrones diferenciados dentro de cada escenario. La Tabla 3.18 presenta los indicadores de cobertura para cada localidad ordenados por escenario y población decreciente.

Tabla 3.18*Indicadores de cobertura por localidad y banda de frecuencia.*

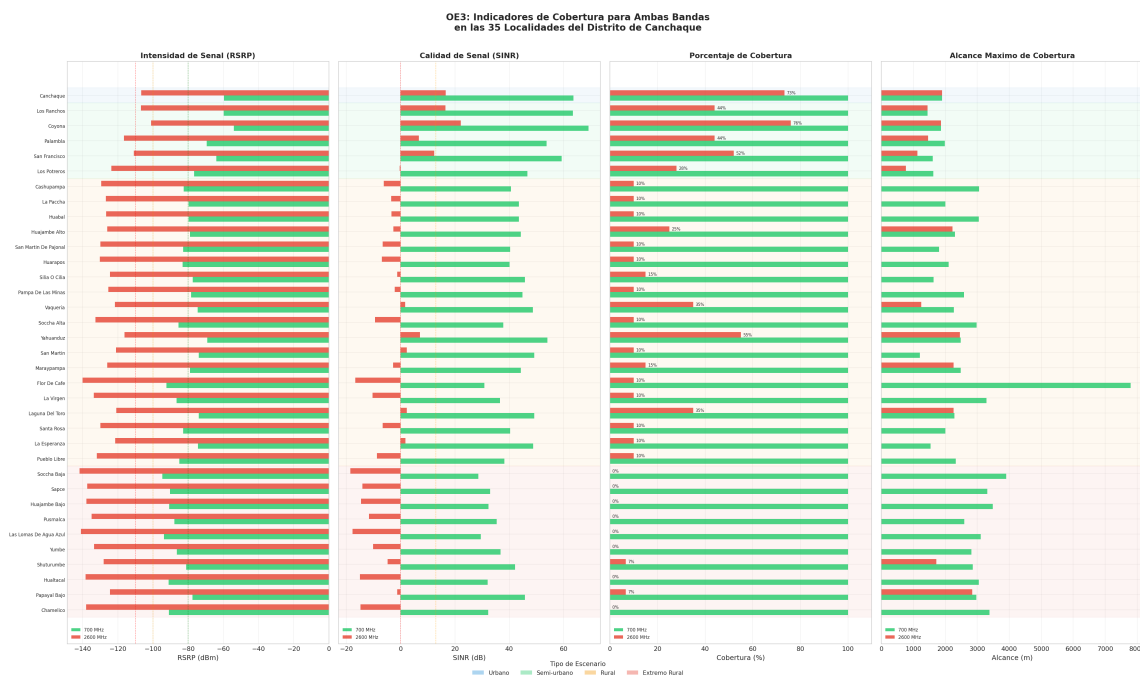
Localidad	Pob.	RSRP (dBm)		SINR (dB)		Cob. (%)		ΔRSRP (dB)
		700	2600	700	2600	700	2600	
Escenario Urbano								
Canchaque	1 453	−59,6	−106,6	63,6	16,6	100	73,3	47,0
Escenario Semi-urbano								
Los Ranchos	511	−59,8	−106,8	63,5	16,5	100	44,0	47,0
Coyona	443	−54,1	−101,1	69,2	22,2	100	76,0	47,0
Palambla	369	−69,5	−116,5	53,8	6,8	100	44,0	47,0
San Francisco	246	−64,0	−110,9	59,3	12,3	100	52,0	46,9
Los Potreros	241	−76,6	−123,6	46,6	−0,3	100	28,0	47,0
Escenario Rural								
Cashupampa	178	−82,6	−129,5	40,6	−6,2	100	10,0	46,9
La Paccha	174	−79,7	−126,7	43,5	−3,5	100	10,0	47,0
Huabal	161	−79,7	−126,7	43,5	−3,4	100	10,0	47,0
Huajambe Alto	147	−78,9	−125,9	44,3	−2,7	100	25,0	47,0
S. M. de Pajonal	139	−82,9	−129,9	40,4	−6,6	100	10,0	47,0
Huarapos	130	−83,2	−130,1	40,1	−6,9	100	10,0	47,0
Silia o Cilia	124	−77,5	−124,5	45,8	−1,2	100	15,0	47,0
Pampa de las Minas	123	−78,4	−125,4	44,8	−2,2	100	10,0	47,0
Vaquería	119	−74,6	−121,6	48,7	1,7	100	35,0	47,0
Soccha Alta	117	−85,4	−132,7	37,8	−9,4	100	10,0	47,2
Yahuanduz	116	−69,1	−116,1	54,1	7,1	100	55,0	47,0
San Martín	115	−74,0	−121,0	49,2	2,3	100	10,0	47,0
Maraypampa	112	−79,0	−126,0	44,2	−2,8	100	15,0	47,0
Flor de Café	111	−92,4	−140,0	30,8	−16,7	100	10,0	47,6
La Virgen	111	−86,6	−133,6	36,6	−10,3	100	10,0	46,9
Laguna del Toro	107	−74,0	−120,9	49,2	2,3	100	35,0	46,9
Santa Rosa	107	−82,9	−129,9	40,4	−6,6	100	10,0	47,0
La Esperanza	105	−74,4	−121,4	48,8	1,8	100	10,0	47,0
Pueblo Libre	101	−85,0	−132,0	38,3	−8,7	100	10,0	47,0
Escenario Extremo Rural								
Soccha Baja	97	−94,7	−141,7	28,6	−18,5	100	0,0	47,1
Sapce	93	−90,3	−137,3	33,0	−14,1	100	0,0	47,0
Huajambe Bajo	91	−90,8	−137,9	32,4	−14,6	100	0,0	47,0
Pusmalca	91	−87,8	−134,8	35,4	−11,6	100	0,0	47,0
L. L. de Agua Azul	89	−93,7	−141,0	29,5	−17,7	100	0,0	47,2
Yumbe	89	−86,4	−133,4	36,8	−10,2	100	0,0	47,0
Shuturumbe	87	−81,1	−128,0	42,1	−4,8	100	6,7	46,9
Hualtacal	80	−91,2	−138,2	32,1	−15,0	100	0,0	47,1
Papayal Bajo	80	−77,5	−124,5	45,7	−1,3	100	6,7	47,0
Chamelico	75	−91,0	−138,0	32,2	−14,8	100	0,0	47,0

La diferencia de RSRP entre ambas bandas se mantuvo notablemente estable en torno a los 47,0 dB a lo largo de las 35 localidades (rango: 46,9–47,6 dB). Este valor es consistente con la pérdida de propagación adicional predicha por el modelo Okumura-Hata al incrementar la frecuencia portadora de 700 MHz a 2600 MHz en entornos de áreas abiertas. La estabilidad de esta diferencia confirma que la brecha de cobertura observada se debe fundamentalmente a las propiedades físicas de propagación de cada banda y no a variaciones locales en la configuración de las simulaciones.

La Figura 3.10 presenta los indicadores de RSRP, SINR y cobertura desglosados por localidad, donde se visualiza la separación sistemática entre ambas bandas.

Figura 3.10

RSRP, SINR y cobertura por localidad para ambas bandas.



3.3.4.1 Localidades críticas

Se identificaron 25 localidades donde la cobertura de 2600 MHz fue inferior al 20 %, de las cuales 8 registraron 0,0 % de cobertura. Todas las localidades con cobertura nula pertenecen al escenario extremo rural, con poblaciones entre 75 y 97 habitantes. En estas localidades, el RSRP de 2600 MHz osciló entre $-133,4$ y $-141,7$ dBm, valores que superan ampliamente el umbral de detección de los terminales LTE (-140 dBm según 3GPP TS 36.101). La localidad más crítica fue Soccha Baja, que con un RSRP de $-141,7$ dBm y un SINR de $-18,5$ dB para

2600 MHz representa el caso extremo de inviabilidad de la banda alta en entornos rurales dispersos.

Las 15 localidades rurales con cobertura de 2600 MHz del 10 % presentan un patrón común: solo los usuarios situados en las inmediaciones del eNodeB (dentro de un radio aproximado de 200–300 m) mantuvieron niveles de RSRP superiores al umbral de cobertura. Este comportamiento se traduce en un alcance efectivo de 0 m para la mayoría de las localidades rurales en 2600 MHz, dado que no se registró alcance con $\text{RSRP} \geq -120 \text{ dBm}$ más allá de la celda central.

3.3.5 Relación entre RSRP y distancia al eNodeB

La Figura 3.11 muestra la relación entre el RSRP y la distancia al eNodeB para ambas bandas, segmentada por tipo de escenario. Se observa la atenuación progresiva de la señal conforme aumenta la distancia, con pendientes diferenciadas según la banda de frecuencia. Para 700 MHz, los niveles de RSRP se mantienen por encima del umbral de cobertura (-120 dBm) incluso a distancias superiores a 7 km, mientras que para 2600 MHz el umbral se alcanza típicamente a distancias de 600–800 m en escenarios rurales.

3.3.6 Distribución acumulada de RSRP por escenario

El análisis de la función de distribución acumulada (CDF) del RSRP permite evaluar la dispersión estadística de la intensidad de señal en cada escenario. La Figura 3.12 presenta las curvas CDF de RSRP para ambas bandas, donde se constata que el percentil 5 (P05) de 700 MHz supera consistentemente al percentil 95 (P95) de 2600 MHz en todos los escenarios, lo que indica que incluso las peores condiciones de recepción en 700 MHz son superiores a las mejores condiciones de 2600 MHz en cada tipo de entorno.

3.3.7 Mapa de calor de indicadores por localidad

La Figura 3.13 presenta un mapa de calor normalizado de los indicadores de cobertura para las 35 localidades, lo que permite identificar visualmente los patrones de degradación progresiva de la señal de 2600 MHz conforme disminuye la población y aumenta la ruralidad del escenario.



Figura 3.11

RSRP en función de la distancia al eNodeB por escenario.

Figura 3.12

Distribución acumulada de RSRP por escenario y banda.

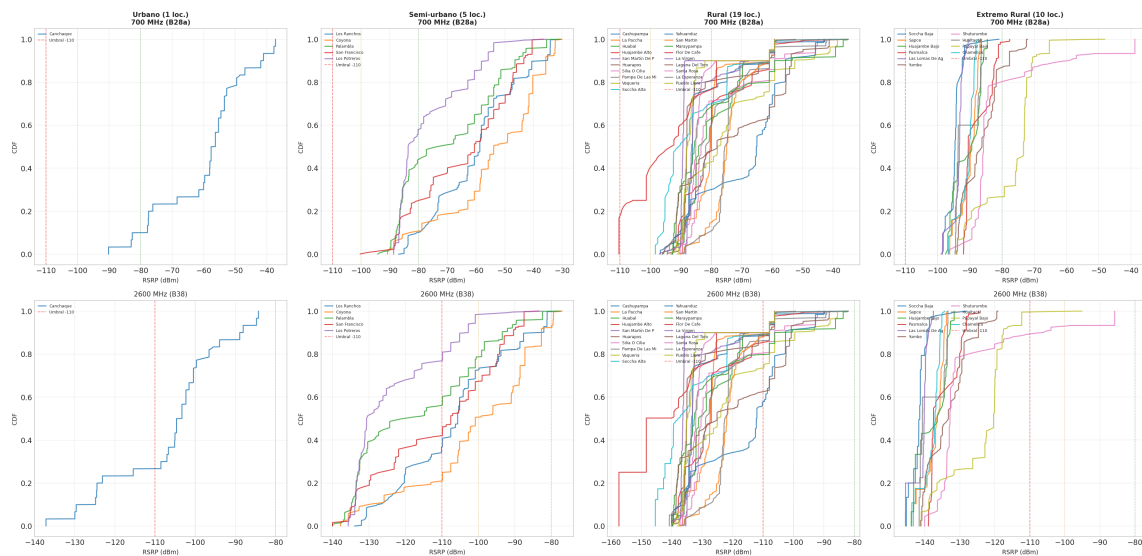
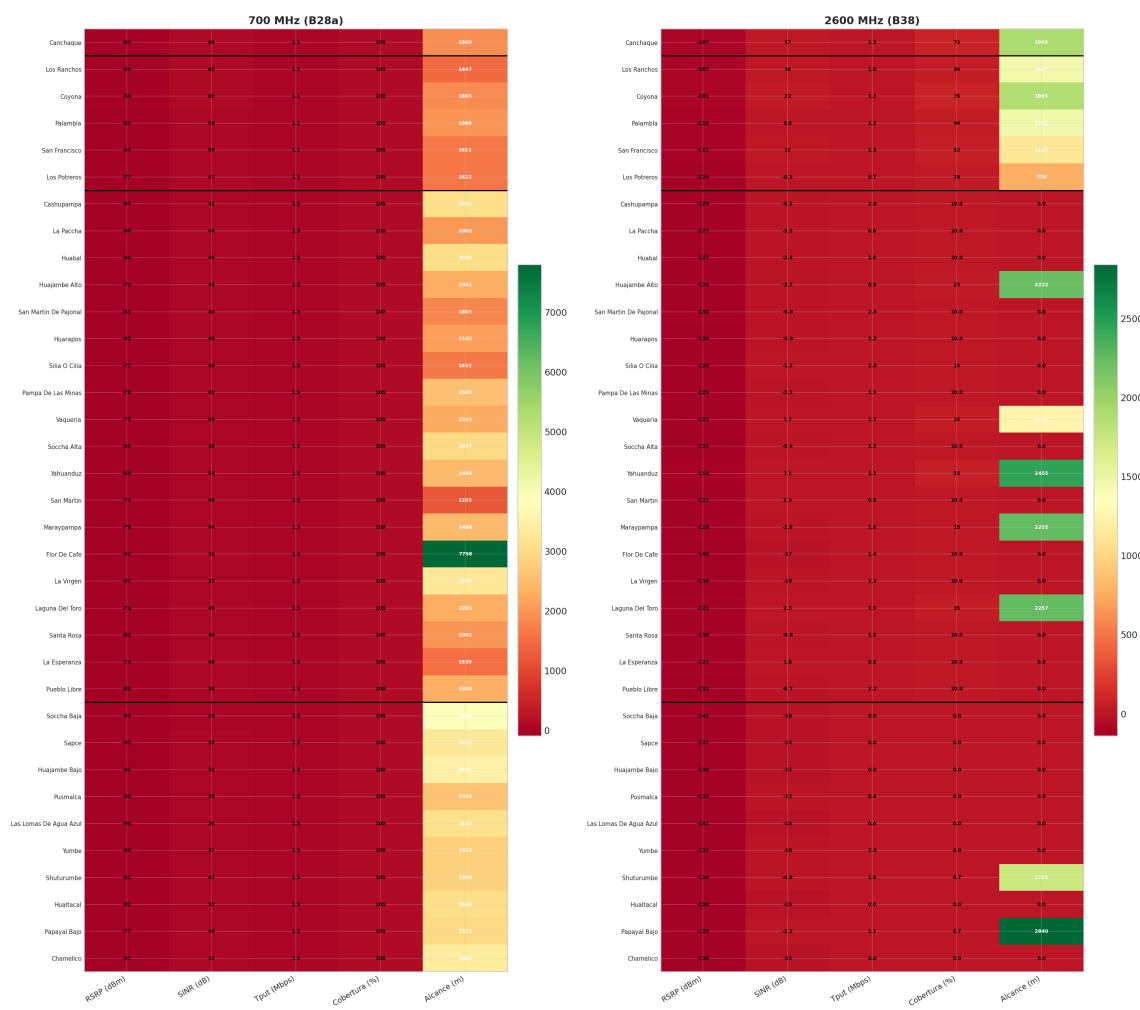


Figura 3.13

Mapa de calor de indicadores por localidad y banda.



3.3.8 Rendimiento por perfil de tráfico

El análisis diferenciado por perfil de tráfico permitió evaluar el impacto de la banda de frecuencia sobre el rendimiento de cada tipo de servicio. La Tabla 3.19 presenta los indicadores promedio de las 35 localidades para cada uno de los seis perfiles implementados en la simulación.

Tabla 3.19

Indicadores de cobertura y throughput por perfil de tráfico.

Perfil	RSRP (dBm)		SINR (dB)		Throughput (Mbps)	
	700	2600	700	2600	700	2600
Video HD (15 %)	-78,1	-125,1	45,1	-1,9	3,082	2,321
Video SD (20 %)	-78,7	-125,8	44,5	-2,5	0,904	0,730
VoIP (10 %)	-79,5	-126,5	43,8	-3,3	0,094	0,043
Web (30 %)	-81,1	-128,1	42,1	-4,9	0,696	0,463
IoT (15 %)	-83,4	-130,4	39,8	-7,2	0,002	0,001
Background (10 %)	-80,5	-127,5	42,8	-4,2	0,292	0,211

Los resultados muestran que la diferencia de RSRP entre bandas se mantuvo prácticamente constante en torno a 47 dB para todos los perfiles de tráfico, lo que confirma que la brecha de propagación es independiente del tipo de servicio. No obstante, el impacto sobre el throughput varía según el perfil. El servicio de Video HD experimentó una reducción del 24,7 % en throughput al pasar de 700 MHz a 2600 MHz (de 3,082 a 2,321 Mbps), mientras que el servicio de VoIP sufrió una caída del 54,3 % (de 0,094 a 0,043 Mbps). Esta diferencia se explica por la mayor sensibilidad de los flujos de baja tasa a la pérdida total de conectividad: cuando el enlace de 2600 MHz se pierde por RSRP insuficiente, los paquetes VoIP —de tamaño reducido y tasa baja— se ven proporcionalmente más afectados que los flujos de alta tasa que logran transmitir ráfagas de datos durante los intervalos de conectividad.

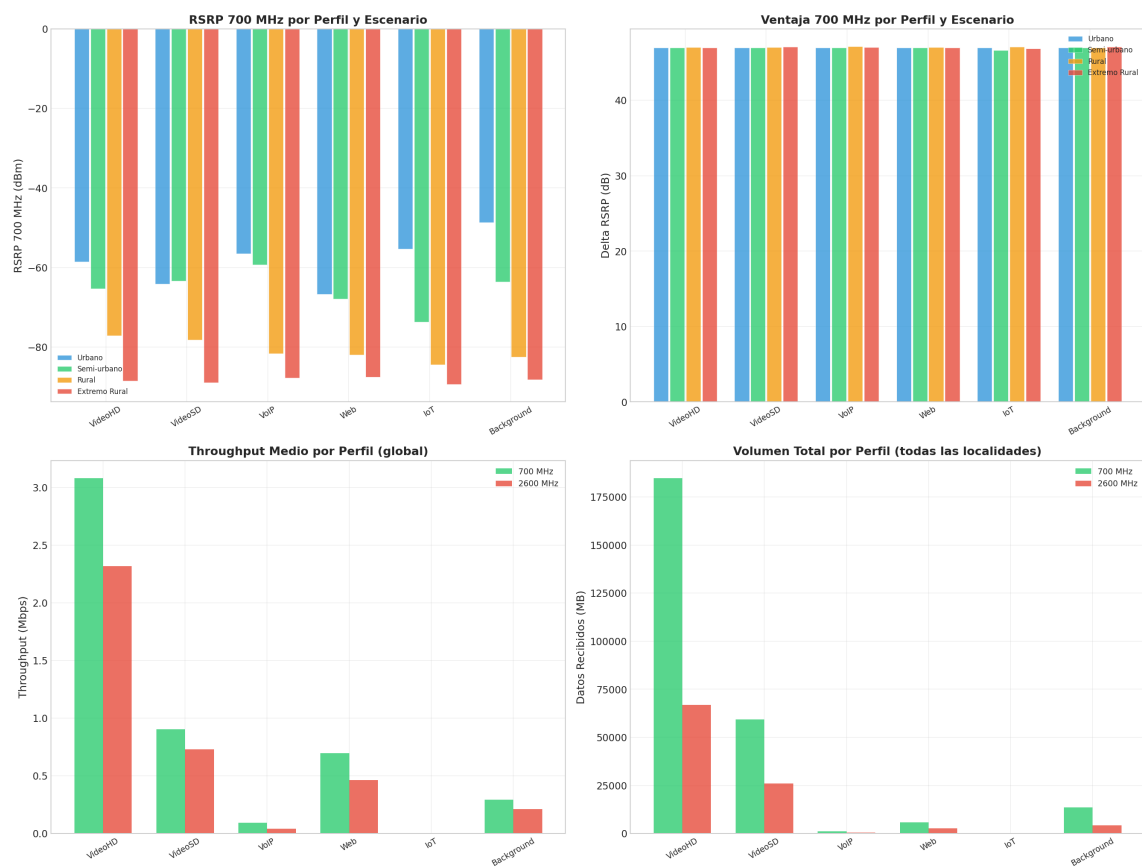
La Figura 3.14 ilustra la comparación de throughput y niveles de señal entre bandas para cada perfil de tráfico.

3.3.9 Throughput por escenario demográfico

El throughput medio presentó un comportamiento diferenciado según el escenario. En los escenarios urbano y semi-urbano, ambas bandas registraron valores similares: 1,093 y 1,319 Mbps (urbano, 700 y 2600 MHz respectivamente) y 1,102 y 1,092 Mbps (semi-urbano). El throughput ligeramente superior de 2600 MHz en el escenario urbano se explica por el mayor

Figura 3.14

Indicadores de cobertura y throughput por perfil de tráfico.



ancho de banda disponible (20 MHz frente a 10 MHz), que permite asignar más bloques de recursos (100 RBs vs. 50 RBs) a los usuarios dentro de la zona de cobertura.

En el escenario rural, los valores fueron de 1,449 Mbps (700 MHz) y 1,592 Mbps (2600 MHz), donde el aparente mejor rendimiento de 2600 MHz se debe a que solo el 16,3 % de los usuarios —los más cercanos al eNodeB y con mejores condiciones de canal— contribuyen al cálculo del throughput medio. En el escenario extremo rural, la caída fue drástica para 2600 MHz (0,510 Mbps frente a 1,457 Mbps de 700 MHz), reflejo de que el 98,7 % de los usuarios carecen de conectividad.

3.3.10 Significancia estadística de las diferencias

Las pruebas estadísticas de contraste entre las distribuciones de RSRP y SINR de ambas bandas arrojaron valores $p = 0,0$ para la totalidad de las 35 localidades, tanto para RSRP como para SINR. Este resultado confirma que las diferencias observadas entre las bandas de 700 MHz y 2600 MHz son estadísticamente significativas con un nivel de confianza superior al 99,99 %, lo que descarta la posibilidad de que las brechas de cobertura sean atribuibles a variabilidad aleatoria de la simulación.

3.4 Comparación de Desempeño por Escenario

El cuarto objetivo específico se orientó a comparar el desempeño de las bandas 700 MHz (B28a) y 2600 MHz (B38) en función de los escenarios demográficos y geográficos definidos para el distrito de Canchaque. Este análisis integra los hallazgos de los tres objetivos previos —la caracterización territorial (OE1), el diseño de la plataforma de simulación (OE2) y la determinación de indicadores de cobertura (OE3)— para responder la pregunta específica PE4 y validar la hipótesis de investigación. La comparación abarca 35 localidades con una población total de 6 532 habitantes, distribuidas en cuatro escenarios demográficos con características diferenciadas de densidad, dispersión y accesibilidad.

3.4.1 Ventaja comparativa de 700 MHz sobre 2600 MHz

El análisis comparativo reveló que la banda de 700 MHz presenta una ventaja sistemática sobre 2600 MHz en las 35 localidades evaluadas. La diferencia media de RSRP fue de 47,0 dB, con un rango estrecho de 46,9 a 47,6 dB, lo que indica una ventaja estructural estable e independiente de las condiciones locales. La diferencia de SINR fue equivalente (47,0 dB en promedio), dado que ambas métricas responden a la misma atenuación diferencial por frecuencia en el modelo Okumura-Hata.

La brecha de cobertura, en cambio, presentó una variabilidad marcada entre localidades: desde 24,0 puntos porcentuales en Coyona (escenario semi-urbano, cobertura 2600 MHz del 76 %) hasta 100,0 puntos porcentuales en las 8 localidades extremo rurales donde la banda de 2600 MHz registró 0,0 % de cobertura. La Tabla 3.20 presenta la ventaja de 700 MHz por localidad, ordenada por escenario y magnitud de la brecha de cobertura.

La Figura 3.15 ilustra la ventaja de 700 MHz sobre 2600 MHz para cada localidad, donde se aprecia la estabilidad de la diferencia de RSRP frente a la variabilidad creciente de la brecha de cobertura.

3.4.2 Comparación por escenario demográfico

La comparación agregada por escenario demográfico permitió cuantificar la relación entre las características poblacionales y la magnitud de la brecha de desempeño. La Tabla 3.21 presenta los indicadores comparativos por escenario, incluyendo la población adicional cubierta por 700 MHz respecto a 2600 MHz.

Tabla 3.20

Ventaja de 700 MHz sobre 2600 MHz por localidad.

Localidad	Escenario	Pob.	Ventaja 700 MHz			Cobertura (%)	
			Δ RSRP (dB)	Δ SINR (dB)	Δ Cob. (pp)	700	2600
Canchaque	Urbano	1 453	47,0	47,0	26,7	100	73,3
Coyona	Semi-urb.	443	47,0	47,0	24,0	100	76,0
San Francisco	Semi-urb.	246	46,9	46,9	48,0	100	52,0
Los Ranchos	Semi-urb.	511	47,0	47,0	56,0	100	44,0
Palambla	Semi-urb.	369	47,0	47,0	56,0	100	44,0
Los Potreros	Semi-urb.	241	47,0	47,0	72,0	100	28,0
Yahuanduz	Rural	116	47,0	47,0	45,0	100	55,0
Vaquería	Rural	119	47,0	47,0	65,0	100	35,0
Laguna del Toro	Rural	107	46,9	46,9	65,0	100	35,0
Huajambe Alto	Rural	147	47,0	47,0	75,0	100	25,0
Silia o Cilia	Rural	124	47,0	47,0	85,0	100	15,0
Maraypampa	Rural	112	47,0	47,0	85,0	100	15,0
12 localidades	Rural	1 672	47,0	47,0	90,0	100	10,0
Shuturumbe	Ext. rur.	87	46,9	46,9	93,3	100	6,7
Papayal Bajo	Ext. rur.	80	47,0	47,0	93,3	100	6,7
8 localidades	Ext. rur.	705	47,0	47,0	100,0	100	0,0

Figura 3.15

Ventaja de 700 MHz en RSRP y cobertura por localidad.



Tabla 3.21*Comparación de desempeño por escenario demográfico.*

Escenario	RSRP medio (dBm)		Cobertura (%)		ΔCob.	Pob. adic.
	700	2600	700	2600	(pp)	(hab.)
Urbano	-59,6	-106,6	100,0	73,3	26,7	387
Semi-urbano	-64,8	-111,8	100,0	48,8	51,2	891
Rural	-80,0	-127,0	100,0	16,3	83,7	2 015
Extremo rural	-88,5	-135,5	100,0	1,3	98,7	861
Global	-79,7	-126,7	100,0	18,3	81,7	4 154

Los resultados revelan un gradiente de desempeño directamente asociado al tipo de escenario. En el escenario urbano, la brecha de cobertura fue de 26,7 puntos porcentuales, donde la banda de 2600 MHz aún logró un 73,3 % de cobertura gracias a la concentración de usuarios dentro de un área de 4 km². En el escenario semi-urbano, la brecha se amplió a 51,2 puntos porcentuales (cobertura 2600 MHz del 48,8 %), con una dispersión interna considerable: Coyona alcanzó el 76,0 % mientras que Los Potreros descendió al 28,0 %.

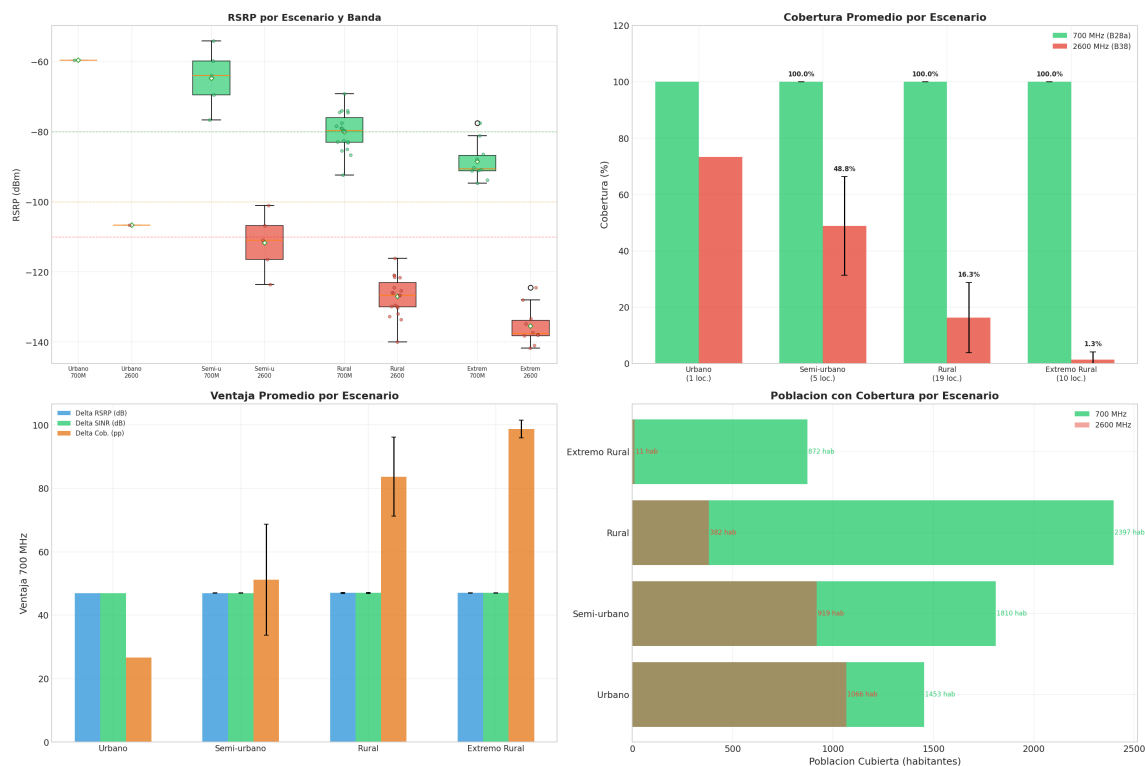
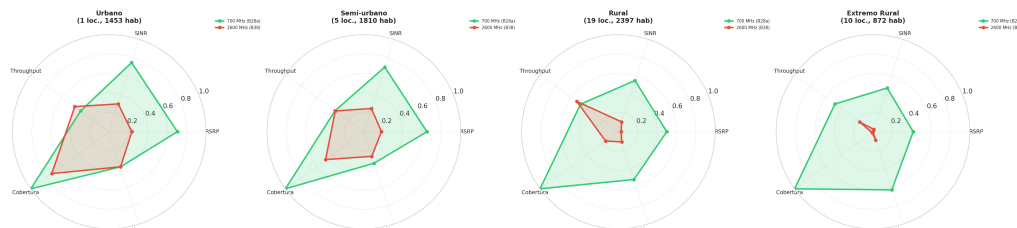
El escenario rural presentó la mayor concentración de población afectada, con 2 015 habitantes adicionales cubiertos exclusivamente por 700 MHz. Las 19 localidades rurales registraron una cobertura media de 2600 MHz de solo 16,3 %, y en 13 de ellas el porcentaje fue del 10 %, correspondiente únicamente a usuarios en las proximidades inmediatas del eNodeB. El escenario extremo rural mostró el caso límite: la banda de 2600 MHz cubrió apenas al 1,3 % de la población (11 de 872 habitantes), lo que la convierte en técnicamente inviable para este tipo de entorno.

La Figura 3.16 presenta la comparación visual de los indicadores por escenario demográfico, donde se observa la ampliación progresiva de la brecha de cobertura.

3.4.2.1 Perfil multidimensional por escenario

La Figura 3.17 presenta un diagrama radar que integra múltiples dimensiones de desempeño (RSRP, SINR, cobertura, throughput) para cada escenario y banda, lo que permite visualizar de manera simultánea las fortalezas y debilidades relativas de cada configuración.

En todos los escenarios, el polígono correspondiente a 700 MHz abarca un área mayor que el de 2600 MHz, y la diferencia se amplía progresivamente hacia los escenarios más rurales. En el escenario urbano, ambos polígonos presentan formas similares con un ligero desfase; en

Figura 3.16*Comparación de indicadores por escenario demográfico.***Figura 3.17***Perfil multidimensional de desempeño por escenario y banda.*

el escenario extremo rural, el polígono de 2600 MHz se reduce prácticamente a un punto, reflejo de la pérdida casi total de funcionalidad.

3.4.3 Impacto poblacional de la brecha de cobertura

La traducción de los indicadores técnicos a términos de impacto poblacional permite dimensionar la relevancia práctica de las diferencias observadas. La Tabla 3.22 presenta el análisis de cobertura poblacional para ambas bandas.

Tabla 3.22

Impacto poblacional de la cobertura por banda.

Indicador	700 MHz	2600 MHz
Población total analizada	6 532 habitantes	
Población cubierta (hab.)	6 532	2 378
Población cubierta (%)	100,0 %	36,4 %
Brecha poblacional (hab.)	4 154	
Brecha poblacional (%)	63,6 %	

La banda de 700 MHz cubrió a la totalidad de los 6 532 habitantes de las 35 localidades simuladas. La banda de 2600 MHz cubrió a 2 378 habitantes, equivalentes al 36,4 % de la población. La brecha resultante de 4 154 habitantes —el 63,6 % de la población analizada— representa a la fracción de la comunidad que quedaría sin servicio móvil 4G si el despliegue se realizara exclusivamente en la banda de 2600 MHz. Esta brecha se concentra en las localidades rurales (2 015 habitantes) y extremo rurales (861 habitantes), precisamente las poblaciones con mayor necesidad de conectividad debido a su aislamiento geográfico.

3.4.4 Análisis de correlación demográfica

Se evaluó la correlación entre variables demográficas y el desempeño de la banda de 2600 MHz para identificar los factores que determinan la viabilidad de esta banda en entornos rurales. La Tabla 3.23 presenta los coeficientes de correlación de Pearson y su significancia estadística.

La población presentó una correlación positiva moderada-alta con la cobertura de 2600 MHz ($r = 0,690$, $p < 0,001$), lo que indica que las localidades más pobladas tienden a registrar mayor cobertura en esta banda. Este resultado se explica por la asociación entre mayor población y menor área de simulación (escenarios más compactos), lo que mantiene

Tabla 3.23*Correlaciones entre variables demográficas y cobertura de 2600 MHz.*

Variable	<i>r</i>	<i>p</i> -valor	Significancia
Población vs. cobertura 2600 MHz	0,690	0,000004	Significativa
N.º viviendas vs. cobertura 2600 MHz	0,696	0,000004	Significativa
Población vs. ventaja de cobertura	-0,690	0,000004	Significativa
Tiempo a capital vs. cobertura 2600 MHz	-0,150	0,391	No significativa

a los usuarios dentro del radio de cobertura del eNodeB. El número de viviendas mostró un comportamiento análogo ($r = 0,696$, $p < 0,001$), consistente con su fuerte correlación con la población.

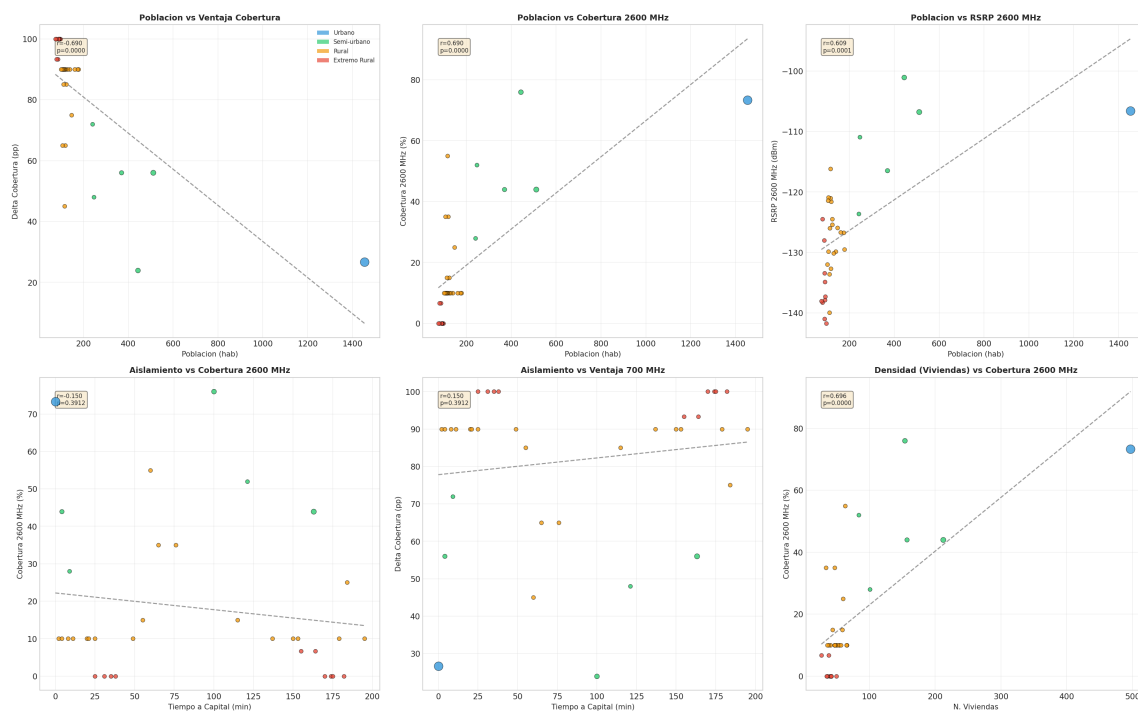
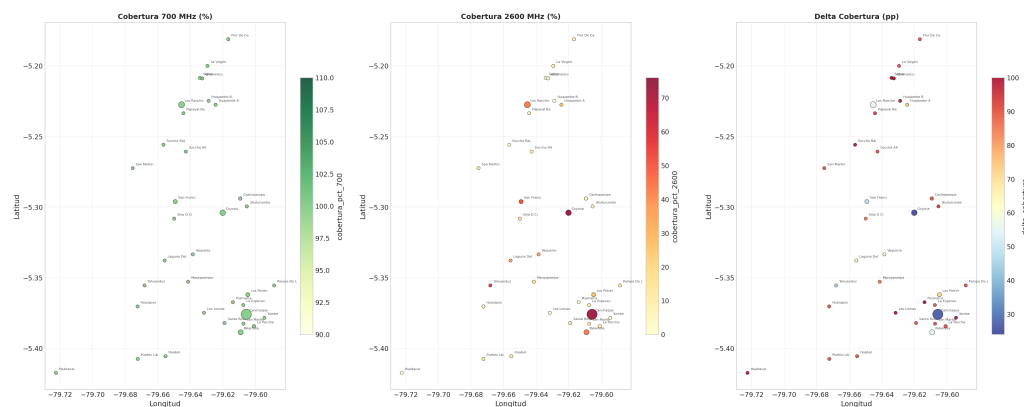
La correlación inversa entre población y ventaja de cobertura ($r = -0,690$) confirma que la superioridad de 700 MHz se acentúa en localidades menos pobladas: a menor población, mayor es la ventaja que ofrece esta banda. El tiempo de viaje a la capital distrital no mostró correlación significativa con la cobertura ($r = -0,150$, $p = 0,391$), lo que sugiere que la accesibilidad vial no es un predictor relevante del desempeño de la red móvil, siendo la densidad poblacional el factor determinante.

La Figura 3.18 presenta los diagramas de dispersión que ilustran las correlaciones entre variables demográficas y el desempeño de la cobertura.

3.4.5 Distribución geográfica de la cobertura

La Figura 3.19 presenta la distribución espacial de las 35 localidades con su respectivo nivel de cobertura para ambas bandas, lo que permite visualizar la extensión territorial del distrito y la concentración de las brechas de cobertura en las zonas periféricas de menor densidad poblacional.

Las localidades con cobertura de 2600 MHz superior al 20 % se concentran en la zona central del distrito, correspondiente a la capital y las localidades semi-urbanas. Las localidades periféricas —rurales y extremo rurales— forman un anillo exterior donde únicamente la banda de 700 MHz proporciona cobertura efectiva. Esta distribución espacial refleja la estructura demográfica identificada en el OE1: un núcleo central relativamente denso rodeado de centros poblados dispersos con poblaciones reducidas.

Figura 3.18*Correlación entre variables demográficas y cobertura.***Figura 3.19***Distribución geográfica de la cobertura por banda.*

3.4.6 Significancia estadística

Las pruebas de contraste estadístico entre las distribuciones de RSRP y SINR de ambas bandas confirmaron que las diferencias son significativas en la totalidad de las 35 localidades analizadas ($p = 0,0$ en todos los casos, nivel de confianza superior al 99,99 %). La Figura 3.20 presenta un resumen visual de los resultados de significancia estadística.

Figura 3.20

Significancia estadística de las diferencias por localidad.

Localidad	Escenario	Pob.	dRSRP	dSINR	dCob.	p-valor	Sig.
Canchaque	Urbano	1453	+47.00	+47.00	+26.7	0.00e+00	***
Los Ranchos	Semi-urbano	511	+47.00	+47.00	+56.0	0.00e+00	***
Coyona	Semi-urbano	443	+47.00	+47.00	+24.0	0.00e+00	***
Palambía	Semi-urbano	369	+46.99	+46.99	+56.0	0.00e+00	***
San Francisco	Semi-urbano	246	+46.93	+46.93	+48.0	0.00e+00	***
Los Potreritos	Semi-urbano	241	+47.00	+47.00	+72.0	0.00e+00	***
Cashupampa	Rural	178	+46.87	+46.87	+90.0	0.00e+00	***
La Pascha	Rural	174	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
Huabal	Rural	161	+46.96	+46.96	+90.0	0.00e+00	***
Huajambe Alto	Rural	147	+47.00	+47.00	+75.0	0.00e+00	***
San Martín De Pajonal	Rural	139	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
Huapagos	Rural	130	+46.99	+46.99	+90.0	0.00e+00	***
Silla O Cilla	Rural	124	+47.00	+47.00	+85.0	0.00e+00	***
Pampa De Las Minas	Rural	123	+46.99	+46.99	+90.0	0.00e+00	***
Vequeria	Rural	119	+47.00	+47.00	+65.0	0.00e+00	***
Soccha Alta	Rural	117	+47.22	+47.22	+90.0	0.00e+00	***
Yahuanduz	Rural	116	+47.00	+47.00	+45.0	0.00e+00	***
San Martín	Rural	115	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
Maraypampa	Rural	112	+47.00	+47.00	+85.0	0.00e+00	***
Flor De Café	Rural	111	+47.56	+47.56	+90.0	0.00e+00	***
La Virgen	Rural	111	+46.95	+46.95	+90.0	0.00e+00	***
Laguna Del Toro	Rural	107	+46.90	+46.90	+65.0	0.00e+00	***
Santa Rosa	Rural	107	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
La Esperanza	Rural	105	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
Pueblo Libre	Rural	101	+47.00	+47.00	+90.0	0.00e+00	***
Soccha Baja	Extremo Rural	97	+47.07	+47.07	+100.0	0.00e+00	***
Sapce	Extremo Rural	93	+47.03	+47.03	+100.0	0.00e+00	***
Huajambe Bajo	Extremo Rural	91	+47.01	+47.01	+100.0	0.00e+00	***
Pusmalca	Extremo Rural	91	+47.00	+47.00	+100.0	0.00e+00	***
Las Lomas De Agua Azul	Extremo Rural	89	+47.23	+47.23	+100.0	0.00e+00	***
Yumbe	Extremo Rural	89	+47.01	+47.01	+100.0	0.00e+00	***
Shuturumbe	Extremo Rural	87	+46.89	+46.89	+93.3	0.00e+00	***
Huaitacal	Extremo Rural	80	+47.09	+47.09	+100.0	0.00e+00	***
Papayal Bajo	Extremo Rural	80	+47.00	+47.00	+93.3	0.00e+00	***
Chamelico	Extremo Rural	75	+47.04	+47.04	+100.0	0.00e+00	***

La consistencia de la significancia estadística a lo largo de las 35 localidades — independientemente del escenario demográfico, la población o la ubicación geográfica— valida la robustez de los resultados y descarta la posibilidad de que las diferencias observadas sean producto de la variabilidad estocástica inherente a las simulaciones.

3.4.7 Validación de la hipótesis de investigación

La hipótesis de investigación postula que “la cobertura de redes móviles 4G a 700 MHz (B28a) presenta mejor desempeño que 2600 MHz (B38) en el distrito de Canchaque considerando sus características demográficas y geográficas”. La Tabla 3.24 sintetiza la evidencia cuantitativa que sustenta la validación.

La evidencia permite confirmar la hipótesis de investigación en las siguientes dimensiones:

Tabla 3.24*Evidencia cuantitativa para la validación de la hipótesis.*

Criterio	700 MHz	2600 MHz	Resultado
RSRP medio (dBm)	-79,7	-126,7	+47,0 dB
SINR medio (dB)	43,6	-3,4	+47,0 dB
Cobertura media (%)	100,0	18,3	+81,7 pp
Alcance medio (m)	2 603	674	×3,9
Población cubierta (%)	100,0	36,4	+63,6 pp
Escenarios con cobertura	4/4	1/4	+3 escenarios
Localidades con $p < 0,05$	35/35	—	100 % signif.

- 1. Dimensión demográfica.** La ventaja de 700 MHz se incrementa conforme disminuye la densidad poblacional: de 26,7 puntos porcentuales en el escenario urbano (363 hab/km²) a 98,7 puntos porcentuales en el escenario extremo rural (2 hab/km²). La correlación significativa entre población y cobertura de 2600 MHz ($r = 0,690$, $p < 0,001$) confirma que la densidad poblacional es un determinante del desempeño relativo de las bandas.
- 2. Dimensión geográfica.** El alcance de cobertura de 700 MHz (2 603 m promedio) resulta 3,9 veces superior al de 2600 MHz (674 m), una diferencia que adquiere relevancia crítica en un distrito con una extensión de aproximadamente 520 km² y topografía montañosa. La distribución espacial de las brechas de cobertura confirma que las localidades periféricas y de difícil acceso dependen exclusivamente de la banda de 700 MHz.
- 3. Dimensión de impacto social.** La brecha de 4 154 habitantes sin cobertura de 2600 MHz (63,6 % de la población analizada) se concentra en las comunidades rurales y extremo rurales, que son precisamente las que presentan mayor necesidad de conectividad debido a su aislamiento.

3.4.8 Recomendaciones de despliegue

Los resultados permiten formular recomendaciones diferenciadas según la zona de despliegue. La Tabla 3.25 sintetiza la estrategia de banda recomendada para cada tipo de zona del distrito.

En la capital distrital de Canchaque, una estrategia híbrida que combine ambas bandas

Tabla 3.25*Estrategia de banda recomendada por zona de despliegue.*

Zona	Tipo	Pob.	Banda	Justificación
Capital	Urbano	1 453	Híbrida (700+2600)	Capacidad + cobertura
5 localidades	Semi-urb.	1 810	700 MHz primaria	2600 MHz parcial
19 localidades	Rural	2 397	700 MHz exclusiva	2600 MHz inviable
10 localidades	Ext. rur.	872	700 MHz exclusiva	2600 MHz inviable

resulta recomendable: la banda de 700 MHz garantiza cobertura total mientras que la banda de 2600 MHz, con 20 MHz de ancho de banda (100 RBs), aporta capacidad adicional para los usuarios concentrados en el núcleo urbano. En las localidades semi-urbanas, la banda de 700 MHz debe constituir la capa de cobertura primaria, con un despliegue eventual de 2600 MHz condicionado a la demanda de tráfico. Para las 29 localidades rurales y extremo rurales, que concentran al 50,1 % de la población analizada, la banda de 700 MHz es la única opción técnicamente viable.

CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Discusión

Los resultados dejan algo muy claro: si queremos llevar internet 4G a las zonas rurales de Canchaque, la banda de 700,MHz es la única alternativa técnicamente viable. Encontramos una diferencia de 47,dB en el RSRP entre las dos bandas analizadas, algo que se repitió en las 35 localidades. No es ninguna sorpresa si miramos la física de las ondas; el modelo Okumura-Hata ya nos advierte que, a mayor frecuencia, mayor es la pérdida de señal, y pasar de 700 a 2600,MHz confirma ese golpe. Pero más allá de los números, lo importante es el impacto social: si usáramos solo la banda alta, 4,154 personas —el 63.6, % de la población— se quedarían totalmente desconectadas.

Es interesante notar cómo crece la falta de cobertura según el lugar. Mientras que en la zona urbana la brecha es de 26.7 puntos, en el campo profundo sube hasta los 98.7. Esto no ocurre poco a poco, sino que parece un "salto al vacío": en cuanto la señal de 2600,MHz baja de los -120,dBm, el servicio simplemente desaparece. En el área rural, casi todos los usuarios ya están por debajo de ese límite. Esto nos dice que no basta con "subirle el volumen.^a la potencia de las antenas de 2600MHz; una brecha de 47dB no se soluciona con pequeños ajustes.

La correlación significativa entre población y cobertura de 2600MHz ($r = 0,690$) revela que el factor determinante no es la accesibilidad vial ni la altitud, sino la densidad poblacional, que a su vez define el área de simulación y la distancia media al eNodeB. Este hallazgo sugiere que las políticas de conectividad rural no pueden trasladar directamente las estrategias de despliegue urbano —basadas en bandas altas y celdas pequeñas— a entornos donde la dispersión poblacional exige radios de cobertura superiores a 2km.

No obstante, los resultados también evidencian una limitación inherente a la banda de 700MHz: su menor ancho de banda (10MHz frente a 20MHz) restringe la capacidad del sistema. En el escenario urbano, el throughput de 2600MHz superó al de 700MHz, lo que indica que en zonas con demanda concentrada la banda alta aporta valor como complemento de capacidad. Esta observación sustenta la recomendación de una estrategia híbrida exclusivamente para la capital distrital, donde la concentración del 19.9 % de la población en un área compacta justifica el costo de un segundo despliegue.

Finalmente, la validación estadística con $p < 0,001$ en las 35 localidades otorga solidez

a los resultados, aunque es pertinente reconocer que las simulaciones emplean un modelo de propagación idealizado (áreas abiertas, sin obstáculos puntuales) que podría subestimar las pérdidas reales en el terreno montañoso de la sierra piurana. Estudios futuros con mediciones de campo permitirían calibrar estos modelos y refinar las estimaciones de cobertura para condiciones específicas del territorio.

La integración de los resultados de los cuatro objetivos específicos permite validar contundentemente la hipótesis general: la banda de 700 MHz presenta un desempeño significativamente superior para el distrito de Canchaque, dictado por las restricciones geográficas y demográficas de la zona. Mientras que el primer objetivo específico se caracterizó la demanda dispersa, en el segundo se proveyó la herramienta para modelarla, los demás objetivos específicos cuantificaron la magnitud física de la brecha (47 dB) y su impacto social (63.6% de exclusión con bandas altas).

La principal contribución de esta investigación radica en la demostración de que la brecha digital rural tiene un componente técnico estructural relacionado con la física de la propagación, más allá de los factores económicos. Al utilizar una simulación híbrida NS-3/SUMO, hemos podido visualizar cómo la topología de la red vial rural y la dispersión de viviendas interactúan con la frecuencia portadora. A diferencia de estudios previos como los de Maslen y Nunez (2021) o Ferreira et al. (2023) que se enfocan en la arquitectura del simulador o el ancho de banda general, este trabajo cuantifica el costo de cobertura.^{en} términos de dB y población excluida para una región andina específica.

Finalmente, nuestros hallazgos complementan la visión de política pública de Moral-Arce et al. (2025) y la visión tecno-económica de Nashiruddin et al. (2024), aportando la evidencia de capa física necesaria para justificar por qué la regulación y la inversión deben priorizar la asignación de bandas bajas (como el dividendo digital) para cerrar la brecha en zonas de geografía compleja, donde la “fuerza bruta” de la potencia de transmisión no puede compensar las limitaciones de la frecuencia.

RECOMENDACIONES

4.2 Recomendaciones

A partir de los hallazgos de la investigación, se formulan las siguientes recomendaciones dirigidas a operadores de telecomunicaciones, entidades reguladoras y la comunidad académica.

Se recomienda que los planes de despliegue de infraestructura 4G en el distrito de Canchaque adopten la banda de 700 MHz (B28a) como capa de cobertura primaria para la totalidad del territorio, dado que fue la única banda que alcanzó el 100 % de cobertura en los cuatro escenarios demográficos evaluados. La banda de 2600 MHz (B38) debería reservarse como complemento de capacidad exclusivamente en la capital distrital, donde la concentración del 19,9 % de la población en un área de 4 km² justifica el despliegue de una segunda capa orientada a satisfacer la demanda de servicios de mayor ancho de banda.

Se sugiere que las entidades reguladoras consideren la diferencia de 47 dB en RSRP y la brecha de 81,7 puntos porcentuales en cobertura entre ambas bandas al momento de definir las obligaciones de cobertura rural asociadas a las concesiones del espectro radioeléctrico. Los resultados indican que exigir cobertura en la banda de 2600 MHz para localidades con poblaciones inferiores a 200 habitantes y áreas de servicio superiores a 16 km² resulta técnicamente inviable sin un incremento sustancial en la densidad de estaciones base.

Se recomienda que futuros estudios de planificación de redes en zonas rurales andinas incorporen la metodología de simulación integrada NS-3/SUMO desarrollada en esta investigación, la cual demostró ser capaz de reproducir las condiciones de propagación y movilidad de entornos con alta dispersión poblacional. La disponibilidad de los escenarios configurados para las 35 localidades de Canchaque permite su reutilización como base para evaluar tecnologías emergentes como 5G NR en bandas bajas o soluciones de acceso fijo inalámbrico (FWA).

Se sugiere complementar los resultados de simulación con campañas de medición de campo que permitan calibrar el modelo de propagación Okumura-Hata para las condiciones topográficas específicas de la sierra de Piura. La validación empírica de la diferencia de 47 dB entre bandas y del alcance de 2 603 m para 700 MHz fortalecería la aplicabilidad de los hallazgos a la toma de decisiones de inversión en infraestructura.

Se recomienda explorar en investigaciones futuras la incorporación de modelos de propagación tridimensionales que consideren el perfil altimétrico del terreno, la vegetación y

las edificaciones rurales, así como la evaluación de técnicas de mejora de cobertura como el uso de repetidores, antenas de mayor ganancia o configuraciones MIMO que podrían extender el alcance de la banda de 2600 MHz en escenarios semi-urbanos donde la brecha de cobertura, aunque significativa, no es absoluta.

Finalmente, se recomienda que las autoridades locales del distrito de Canchaque utilicen los resultados de esta investigación como sustento técnico para gestionar ante el Ministerio de Transportes y Comunicaciones y el Fondo de Inversión en Telecomunicaciones (FITEL) la priorización de proyectos de conectividad rural en la banda de 700 MHz, orientados a cerrar la brecha digital que afecta al 63,6 % de la población que actualmente carece de cobertura móvil 4G.

CONCLUSIONES

En relación con el primer objetivo específico, se identificaron las características demográficas y geográficas de las 62 localidades del distrito de Canchaque, cuya población de 7 317 habitantes presenta un coeficiente de variación del 167,5 %, indicativo de una dispersión extrema. Se seleccionaron 35 localidades con población igual o superior a 75 habitantes y se clasificaron en cuatro escenarios de simulación: urbano (1 localidad, 1 453 hab., 4 km²), semi-urbano (5 localidades, 200–511 hab., 9 km²), rural (19 localidades, 100–178 hab., 16 km²) y extremo rural (10 localidades, 75–97 hab., 36 km²). Esta categorización, fundamentada en datos del INEI y análisis geoespacial, permitió definir escenarios representativos que capturan la heterogeneidad del territorio y constituyen la base para las simulaciones de movilidad en SUMO.

Respecto al segundo objetivo específico, se diseñó e implementó una plataforma de simulación que integra NS-3 v3.43 con SUMO v1.25.0 para evaluar el desempeño de las bandas 700 MHz (B28a, EARFCN 9410, 10 MHz) y 2600 MHz (B38, EARFCN 37900, 20 MHz). La arquitectura comprende el módulo LENA de NS-3 con el modelo de propagación Okumura-Hata para áreas abiertas, un scheduler Proportional Fair, seis perfiles de tráfico diferenciados y trazas de movilidad FCD generadas por SUMO con patrones peatonales y vehiculares. Se ejecutaron 70 simulaciones (35 localidades × 2 bandas) de 3 600 segundos cada una, orquestadas mediante un sistema automatizado de ejecución paralela. La conversión de coordenadas geográficas a metros mediante proyección equirectangular y la interpolación temporal de trazas SUMO garantizaron la coherencia espacial entre ambos simuladores.

En cuanto al tercer objetivo específico, los indicadores de cobertura revelaron una diferencia estructural de 47,0 dB en RSRP entre ambas bandas, constante a lo largo de las 35 localidades. La banda de 700 MHz registró un RSRP medio de -79,7 dBm, un SINR de 43,6 dB y un 100 % de cobertura en todos los escenarios. La banda de 2600 MHz alcanzó un RSRP de -126,7 dBm, un SINR de -3,4 dB y una cobertura media del 18,3 %, con 8 localidades en 0,0 % y 25 por debajo del 20 %. El alcance de 700 MHz (2 603 m) resultó 3,9 veces superior al de 2600 MHz (674 m). Todas las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0,001$) en la totalidad de las localidades evaluadas.

Con relación al cuarto objetivo específico, la comparación por escenario demográfico

demostró que la brecha de cobertura se amplifica progresivamente: 26,7 puntos porcentuales en el escenario urbano, 51,2 en el semi-urbano, 83,7 en el rural y 98,7 en el extremo rural. La banda de 700 MHz cubrió al 100 % de la población analizada (6 532 hab.), frente al 36,4 % de 2600 MHz (2 378 hab.), con una brecha de 4 154 habitantes concentrada en las comunidades de mayor aislamiento. La correlación significativa entre población y cobertura de 2600 MHz ($r = 0,690$, $p < 0,001$) identificó a la densidad poblacional como el factor demográfico determinante del desempeño relativo de las bandas. La hipótesis de investigación quedó validada en sus dimensiones demográfica, geográfica y de impacto social.

En conclusión, la evaluación integral de la cobertura de redes móviles 4G en el distrito de Canchaque, realizada mediante simulación NS-3 integrada con SUMO sobre 35 localidades y dos bandas de frecuencia, demostró que la banda de 700 MHz (B28a) presenta un desempeño superior al de 2600 MHz (B38) en todas las métricas evaluadas y en todos los escenarios demográficos y geográficos. La ventaja de 47 dB en intensidad de señal, 81,7 puntos porcentuales en cobertura y un alcance 3,9 veces mayor se traducen en la capacidad de cubrir a la totalidad de la población, frente al 36,4 % que alcanza la banda alta. Estos resultados confirman que, para territorios rurales con alta dispersión poblacional y topografía montañosa como el distrito de Canchaque, la banda de 700 MHz constituye la opción técnicamente apropiada para garantizar conectividad 4G, mientras que la banda de 2600 MHz debe reservarse como complemento de capacidad exclusivamente en el núcleo urbano de la capital distrital.

Limitaciones del estudio y líneas de investigación futura

Limitaciones del estudio

La presente investigación empleó el modelo de propagación Okumura-Hata en su variante de áreas abiertas y ciudad pequeña, el cual asume un terreno relativamente plano sin obstáculos puntuales. El distrito de Canchaque presenta una topografía montañosa con valles encajonados, laderas pronunciadas y vegetación densa en ciertos sectores, condiciones que introducen pérdidas adicionales por difracción, dispersión y absorción que el modelo utilizado no captura de manera explícita. En consecuencia, los valores de RSRP reportados podrían sobreestimar la intensidad de señal real, particularmente en localidades ubicadas en fondos de valle o tras crestas montañosas donde la línea de vista directa al eNodeB se encuentra obstruida.

Las simulaciones consideraron un único eNodeB por localidad, configurado con antena

isotrópica y sin sectorización. En un despliegue real, los operadores emplean antenas sectoriales con ganancias de 15–18 dBi y configuraciones de dos o tres sectores que modifican el patrón de radiación y, por tanto, la distribución espacial de la cobertura. La ausencia de sectorización en el modelo implica que los resultados representan un caso base conservador en términos de ganancia de antena, aunque optimista en cuanto a la uniformidad de la cobertura azimutal.

El estudio no incorporó interferencia intercelular, dado que cada localidad se simuló con una celda aislada. En un escenario de despliegue multicelda, la interferencia co-canal degradaría el SINR, especialmente en los bordes de celda y en la banda de 2600 MHz donde la reutilización de frecuencia es más agresiva. Los valores de SINR reportados, por tanto, representan un límite superior del desempeño alcanzable en condiciones de red real.

Los patrones de movilidad generados por SUMO se basaron en la red vial disponible en OpenStreetMap, cuya cobertura en zonas rurales del Perú presenta vacíos y simplificaciones. En localidades extremo rurales, donde las vías son predominantemente caminos de herradura o trochas no cartografiadas, las trazas de movilidad podrían no reflejar fielmente los desplazamientos reales de la población. Asimismo, la distribución de perfiles de tráfico se definió con base en referencias bibliográficas internacionales y no en mediciones de consumo local, lo que podría introducir desviaciones respecto a los patrones de uso efectivos de la población de Canchaque.

Finalmente, las simulaciones se ejecutaron con una semilla aleatoria única, lo que limita la representatividad estadística de los resultados frente a la variabilidad estocástica del canal. Si bien la duración de 3 600 segundos por simulación genera un volumen de muestras suficiente para estabilizar los promedios, la ejecución con múltiples semillas habría permitido cuantificar intervalos de confianza más robustos.

Líneas de investigación futura

Los resultados de esta investigación abren diversas líneas de trabajo que podrían profundizar y extender los hallazgos obtenidos.

Una primera línea consiste en la realización de campañas de medición de campo con equipos de drive test en las localidades simuladas, lo que permitiría contrastar los valores de RSRP y SINR predichos por el modelo Okumura-Hata con mediciones reales y, a partir de las discrepancias, calibrar los parámetros del modelo o migrar hacia modelos de propagación más

precisos como el 3GPP TR 38.901 para entornos Rural Macro (RMa) que incorporan pérdidas por terreno irregular.

Una segunda línea se orienta a la evaluación de tecnologías 5G NR en bandas bajas (n28, 700 MHz) para las mismas localidades, lo que permitiría cuantificar las mejoras en eficiencia espectral, latencia y capacidad que ofrece la quinta generación respecto a LTE, manteniendo las ventajas de propagación de la banda de 700 MHz. La plataforma de simulación desarrollada podría adaptarse al módulo NR de ns-3 para este propósito.

Una tercera línea propone la incorporación de modelos de propagación tridimensionales que integren el modelo digital de elevación del terreno, datos de cobertura vegetal y clasificación de uso del suelo, lo que permitiría simular con mayor fidelidad las condiciones de propagación en la sierra piurana. Herramientas como SPLAT! o el modelo Longley-Rice, combinadas con datos SRTM de 30 metros de resolución, podrían capturar los efectos de difracción por relieve que el modelo Okumura-Hata omite.

Una cuarta línea contempla el análisis económico de las estrategias de despliegue, incorporando costos de infraestructura (torres, equipos, energía solar, backhaul satelital), costos operativos y proyecciones de demanda para determinar la viabilidad financiera de la cobertura rural en la banda de 700 MHz. Este análisis complementaría la evaluación técnica con criterios de sostenibilidad económica que son determinantes para la toma de decisiones de inversión por parte de los operadores y los fondos de acceso universal.

Finalmente, se propone extender el estudio a otros distritos de la sierra de Piura y de la región andina del Perú con características demográficas y geográficas similares, con el objetivo de evaluar la generalización de los hallazgos obtenidos en Canchaque y construir un marco de referencia para la planificación de redes móviles rurales a escala regional.

REFERENCIAS

- Agarwal, A., & Canfield, C. (2024). Analysis of rural broadband adoption dynamics: A theory-driven agent-based model. *PLOS ONE*, 19(6), e0302146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302146>
- Bermúdez Orozco, H. F., Campo Muñoz, W. Y., Astaiza Hoyos, E., Bermúdez Orozco, H. F., Campo Muñoz, W. Y., & Astaiza Hoyos, E. (2021). Characterization of Traffic for Live Video Streaming Services on DASH in 4G Networks Based on Syntactic Analyzers. *Ingeniería*, 26(3), 381-400. <https://doi.org/10.14483/23448393.17960>
- Cabrera-Castellanos, D. F., Aragón-Zavala, A., & Castañón-Ávila, G. (2021). Closing Connectivity Gap: An Overview of Mobile Coverage Solutions for Not-Spots in Rural Zones [Number: 23]. *Sensors*, 21(23), 8037. <https://doi.org/10.3390/s21238037>
- Fadhila, P. A., & Nashiruddin, M. I. (2021). Planning & Simulation Analysis of 4G LTE-Advanced Mobile Network Deployment Using 2100 MHz Frequency Spectrum in Dense Urban Area: Case Study in Central Jakarta. *2021 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 8-14. <https://doi.org/10.1109/apwimob51111.2021.9435227>
- Feltrin, L., Jaldén, N., Trojer, E., & Wikström, G. (2021). Potential for Deep Rural Broadband Coverage With Terrestrial and Non-Terrestrial Radio Networks. *Frontiers in Communications and Networks*, 2. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.691625>
- Ferreira, G. C., Barreto, P. S., Caetano, M. F., Alchieri, E., Araujo, D. C., Cavalcanti, R. P., & Sousa, D. A. (2023). 5G-RCOLAB: A system level simulator for 5G and beyond in rural areas. *Computer Communications*, 212, 161-181. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.09.026>
- Hui, C. Y., Abdulla, A., Ahmed, Z., Goel, H., Monsur Habib, G. M., Teck Hock, T., Khandakr, P., Mahmood, H., Nautiyal, A., Nurmansyah, M., Panwar, S., Patil, R., Rinawan, F. R., Salim, H., Satav, A., Shah, J. N., Shukla, A., Tanim, C. Z. H., Balharry, D., . . . the RESPIRE Group. (2022). Mapping national information and communication technology (ICT) infrastructure to the requirements of potential digital health interventions in low- and middle-income countries. *Journal of Global Health*, 12. <https://doi.org/10.7189/jogh.12.04094>

- Jaimes-Illanes, G. (2021). PLANNING AND SIMULATION FOR RADIO ACCESS NETWORKS ON “SMALL CELLS” TECHNOLOGY FOR HETEROGENEOUS ENVIRONMENTS. *Investigación & Desarrollo*, 21(1), 17-36. Consultado el 24 de julio de 2025, desde http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2518-44312021000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Manap, Z., Mohd Zain, A. S., Mohd Said, R., & Shivaneson Balakirisnan, S. (2020). Analysis of 4G mobile network coverage in UTeM technology campus. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(2), 882. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i2.pp882-889>
- Maslen, A., & Nunez, M. (2021). *Customized NS-3 Simulation for Bandwidth Assessment of Rural Communities* [Tesis de Grado]. Worcester Polytechnic Institute.
- Moral-Arce, I., Gorriti, M., & Gómez-Antonio, M. (2025). Impact evaluation of broadband investment on coverage and household internet use in rural areas. *Papers in Regional Science*, 104(3), 100099. <https://doi.org/10.1016/j.pirs.2025.100099>
- Nashiruddin, M. I., Rahmawati, P., Nugraha, M. A., Hanuranto, A. T., Suryanegara, M., & Fuadah, Y. N. (2024). Sensitivity Options of 5G Non-Standalone Deployment Strategies: A Simulation Model for Emerging Countries. *TEM Journal*, 36-49. <https://doi.org/10.18421/tem131-04>
- Plastras, S., Tsoumatidis, D., Skoutas, D. N., Rouskas, A., Kormentzas, G., & Skianis, C. (2024). Non-Terrestrial Networks for Energy-Efficient Connectivity of Remote IoT Devices in the 6G Era: A Survey [Number: 4]. *Sensors*, 24(4), 1227. <https://doi.org/10.3390/s24041227>
- Rodríguez Lau, A., Marante Rizo, F. R., Morales Roche, T. A., Rodríguez Lau, A., Marante Rizo, F. R., & Morales Roche, T. A. (2022). Escenario urbano 5G en MATLAB, desarrollo y simulación. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 43(2), 62-75. Consultado el 24 de julio de 2025, desde http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59282022000200062&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ubaidullah, A. (2022). Improving Coverage and Signal Quality in Cellular Communications for Rural Areas [Number: 1]. *International Journal of Science, Engineering and Information Technology*, 7(1), 367-371. <https://doi.org/10.21107/ijseit.v7i1.18475>

- Utama, I., Yefta Ruben Hasian Aruan, Rochmawati, Riri Fitri Sari & Harwahyu, R. (2022). 5G MMWave Network Performance Evaluation with Blockage Simulation. *Evergreen*, 9(4), 1236-1243. <https://doi.org/10.5109/6625735>
- Zreikat, A. I., & Alabed, S. (2022). Performance Modeling and Analysis of LTE/Wi-Fi Coexistence [Number: 7]. *Electronics*, 11(7), 1035. <https://doi.org/10.3390/electronics11071035>
- Zreikat, A. I., & Mathew, S. (2024). Performance Evaluation and Analysis of Urban-Suburban 5G Cellular Networks [Number: 4]. *Computers*, 13(4), 108. <https://doi.org/10.3390/computers13040108>